INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



TORMENTAS ELECTRICAS

Enero 1989
500 PTAS.

INVESTIGACION Y

CIENCIA

Enero de 1989 Número 148

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Blai Sanahuja: *Oscilaciones cuasiperiódicas en fuentes celestes de rayos X*; Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *¿Por qué es metastásica la célula tumoral?*; Manuel Puigcerver: *Electrificación en las tormentas*; Ramón Pascual: *Turbulencia superfluida*; Amando García Rodríguez: *Fibras ópticas de infrarrojos*; Elisa Villa: *Evolución de la marcha humana*; Ana García García: *Vacunas para el Tercer Mundo*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Carles M. Cuadras, Juan Ramón Medina, Luis Alonso y Emilio Balaguer

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7-11	Emilio F. Morán y Ricardo Génova
15	George Retseck
16	Andrew Christie
17	Michiel van der Klis
18	George Retseck
20	Andrew Christie
21	George Retseck
25	Daniel Zagury, Universidad de París
26-31	Patricia J. Wynne
42-43	Greg Gilbert, *The Seattle Times*
44-47	Joe Lertola
48	Gordon Gerber (*arriba*); Richard E. Orville, Universidad estatal de Nueva York en Albany (*abajo*)
49	Los Alamos National Laboratory (*arriba*), Earle R. Williams (*abajo*)
50	Joe Lertola
51	National Aeronautics and Space Administration
55	Klaus W. Schwarz, Thomas J. Watson Research Center
56-58	George V. Kelvin
59	Russell J. Donnelly
60-61	George V. Kelvin
65	GTE Laboratories, Inc.
66-68	Hank Iken
69	James A. Harrington, Hughes Research Laboratories
73	Larry Rubens, Kent State University
74-77	Carol Donner
78	Carol Donner (*arriba*), C. Owen Lovejoy (*abajo*)
79	Carol Donner
83	Sean Sprague, UNICEF
84	Johnny J. Johnson
85	Edward Bell
86	U.S. Centers for Disease Control
90-93	Michael Goodman
95-99	Andrew Christie



LA PORTADA es una fotografía que recoge las descargas eléctricas de una tormenta desencadenada sobre una montaña de las proximidades de la ciudad de Tucson, en el estado de Arizona. Los relámpagos alcanzan diferencias de potencial de millones de volt y corrientes de hasta 10 kiloampère. La espectacularidad del acontecimiento eléctrico resalta si lo comparamos con los postes del tendido.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

– Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
– En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
– El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Gregorio de los Ríos fue nombrado por Felipe II "capellán de la Casa del Campo... por la buena relación que se me ha hecho de su virtud y exemplo (como) clérigo presbítero", con la obligación adicional expresa de poner al servicio de los sitios reales "la experiencia que tiene de cosas de plantas y jardines". Su actividad en este terreno le condujo poco después a publicar *Agricultura de jardines, que trata de la manera que se han de criar, gobernar y conservar las plantas* (1592), primer libro impreso en el mundo sobre el tema.

El interés de Felipe II por los jardines ha sido puesto de relieve por la mayoría de los biógrafos de este monarca, aunque fue Agustín G. de Amezúa el primero que dio a conocer la principal documentación de archivo. En 1550, siendo todavía regente, Felipe II dictó minuciosas instrucciones para plantar árboles en gran escala en el sitio real de Aranjuez, que amplió a lo largo del decenio con nuevas disposiciones relativas a varios lugares regios. Desde su regreso a la península en 1569 se preocupó de forma continuada de la organización y el cuidado de los jardines reales, principalmente en Aranjuez, pero también en la Casa de Campo, El Pardo, Segovia y, más tarde, El Escorial. Entraron a su servicio numerosos jardineros, en su mayoría flamencos y franceses, y ordenó traer grandes cantidades de árboles, plantas y semillas de Flandes, Francia, Valencia, Sevilla y Málaga. Dichos jardines estaban destinados al embellecimiento de los sitios reales y solamente el de "la isla de Aranjuez" parece haberse convertido, además, en un auténtico jardín botánico. Era proverbial por su belleza y frondosidad, contando con más de doscientos mil árboles, pero no faltan testimonios indicativos de que no fue un mero parque decorativo. Francisco Franco, un médico setabense afincado en Sevilla, afirma, por ejemplo, en un libro publicado en 1569: "El Rey don Felipe, nuestro señor, ha enviado un herbolario diligentísimo, que anda por esta Andalucía con un catálogo de yerbas, buscando los puestos de ellas para llevarlas a Aranjuez, en donde Su Majestad [...] hace grandes jardines para poner todo género de plantas, así de las hermosas, que deleitan con su vista, como las demás [...] útiles para el uso medicinal". Junto a las plantas europeas y españolas, no debieron faltar en Aranjuez las procedentes de América, sobre todo después de la gran expedición dirigida por Francisco Hernández que el monarca envió al Nuevo Mundo en la década de los setenta. Había también allí una importante colección de animales.

El flamenco Jehan Lhermite, que fue gentilhombre de cámara de Felipe II, se refiere en su obra *Le passetemps* a los jardines reales de Aranjuez, de los que ofrece incluso un plano general. Además de ocuparse de las grandes plantaciones de árboles y del jardín propiamente dicho, alude a los principales animales reunidos en dicho sitio: cuarenta camellos, cinco o seis avestruces, gran número de pavos reales y "toda clase de pájaros de diferentes países", entre ellos, de las Indias.

La *Agricultura de jardines*, que Gregorio de los Ríos dedicó al propio Felipe II, incluye tres partes. La primera, de carácter general, expone "lo que ha de hacer el dueño del jardín", "lo que el jardinero debe hacer", "lo que requiere el jardín" e "instrucciones para sembrar semillas y saber otras dificultades muy importantes". La segunda, titulada "orden de criar y conservar plantas de yerbas y flores", acomodadas para adornar y hermosear más de un centenar de especies, entre ellas, bastantes procedentes de América. La tercera ofrece amplios estudios monográficos acerca del cultivo e injerto de los naranjos y de la forma de "gobernar las parras", así como una especie de apéndice sobre la cría del ruiseñor.

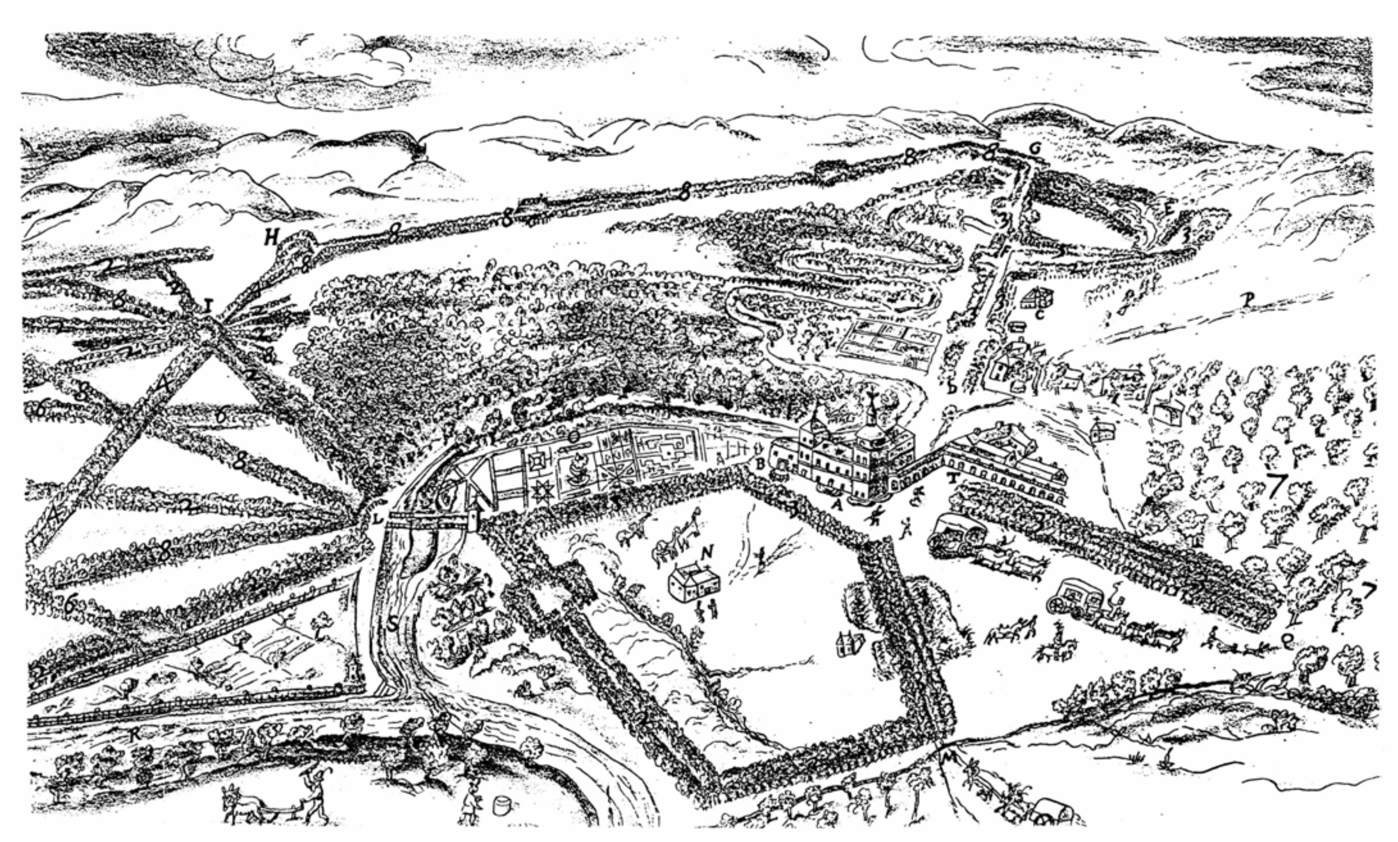
El libro de Gregorio de los Ríos fue reeditado entre 1598 y 1667 en ocho ocasiones, todas ellas conjuntamente con la *Agricultura general*, de Gabriel Alonso de Herrera. La única edición independiente de su texto, aparte de la primera, ha sido la publicada en 1951 por la Sociedad de Bibliófilos Españoles.

Como muestra del contenido de este clásico de la jardinería reproducimos un par de fragmentos de su introducción: "He querido tomar este trabajo para que todos se aprovechen dél y se sepan y entiendan todas las maneras de plantas comunes que se ponen en los jardines, no metiéndome en las medicinales, sino en aquellas que tienen buena flor y vista; porque en los jardines, por ser pequeños, no se requieren plantas medicinales, porque no los ahoguen, sino las de flores agradables a la vista. Y cuando se quisieren tener medicinales, se ha de hacer un rejardín para tenerlas; y así, no trataré de ellas, sino de las que comúnmente requieren los jardines; y no de las propiedades de ellas, porque esto se queda y toca a los herbolarios. Y teniéndose consideración a que los que han escrito de agricultura, y naturaleza y propiedad de los árboles y hierbas, jamás han tocado este particular de la población de los jardines, ni de la conservación de las plantas y verduras que en ellos se ponen, podré decir con razón ser yo el primero que escribe esta materia; y por esta razón, muy excusado, y disculpado en lo que aquí faltare. Debiéndoseme dar crédito en lo que por experiencia he descubierto, pues atento que no hay quien haya tratado esta materia conforme a las circunstancias de esta constelación, no se puede probar con autoridades de otros. Lo cual ha sido causa de haber tomado mucho trabajo en esto, averiguándolo todo por experiencias, con mucho cuidado y diligencia...

"Las semillas se siembran en creciente de marzo. Algunas de ellas es bueno sembrarlas en tiestos, y después trasponerlas en los cuadros, cuando estén para ello, que si las siembran en las eras o cuadros la babosilla las roza, que, como están tiernas, no las deja salir. Siémbrese adonde, en saliendo el sol, las dé; porque el sol de la mañana les hace mucho provecho, que como quedan de la noche resfriadas y ateridas han menester calor. Riéguense con agua que no esté muy fría, porque, como están chiquitas y tiernas, las penetra y no medran. Riéguense con sol, que crecerán mucho, y toda planta chiquita requiere esto; lo cual es al contrario cuando las plantas son grandes, como se dice arriba en lo que requiere el jardín. También se siembran en prin-

cipio de septiembre, y estas tales vienen a llevar flor al otro septiembre parte de ellas y algunas la primavera, según que es cada una. Otras hay que llevan flor por mayo, y si las siembran por marzo llevan al septiembre, que son la escobilla y espuela caballera y otras muchas; y éstas, cuando llevan por mayo, están sembradas por septiembre. Quiero decir que luego, como cae la semilla, nace, y así pasan todo el invierno; y nacidas de esta manera echan la primavera y de la otra al septiembre. Yo hallo que en tierras frías es mejor sembrar en abril, porque con el calor a dos días luego salen, y aún son mejores que las de marzo, que estas tales están empedernidas y encogidas con el frío, que nunca acaban de salir. También se pueden sembrar hasta fin de mayo. Y las que forzosamente se quieren sembrar en marzo y en abril son las siguientes: albahaca, ajedrea, habas de las Indias, balsamina, bredos, campanillas azules, cardíaca menor, cidronela, claveles de las Indias, coloquíntidas, estramónica, gigantas, zerafolium, mexicanas, papagayos, pomates, penachos, pimientos, besicos de monja y todas las demás que se acaban por la otoñada. Estas quieren criarse con mucha agua y estiércol. Y toda planta que se siembra en estos dos meses y acaba como está dicho requiere criarla de presto, para que lleve flor. Cuando hiciere tiempo húmedo, se transpongan; y si hubiere soles, tápenlas con unas tejas o hojas y riéguense cada tarde, y estén tapadas mientras el sol durare, y a la tarde las descubran; esto se haga cuatro o seis días, hasta que hayan casi prendido.

"Cuanto al regar, no hay medida de cuántas veces haya de ser, respeto de lo que llueve: y así, muchas veces no es menester regarlas. Y para esto se ha de cavar un poco la tierra, y si mostrare humedad, aunque esté seca por encima, no se riegue, porque se aguazarán las plantas; antes se ha de ir con letura de darles el agua con deseo. Adviértase si el jardín está baxo, o si tiene árboles o casas que le quiten el sol, y qué horas tiene de sol, y mídase el agua conforme a la sombra que tuviere. Mírese mucho qué color tienen las plantas, que si están amarillas, se van perdiendo, y es señal de mucha agua: en tal caso, es el remedio quitársela para que vuelvan en su ser: y desde mediado agosto se la vayan quitando poco a poco; lo uno, porque granen las que han de granar; y lo otro, para que se recojan las demás y se reparen, y no entren aguazadas en el invierno: porque si lo entran, todas se hielan. Y aunque es verdad que hay muy pocas plantas que se hielen, pero, las que se hielan, les sucede de entrar tiernas y sin fuerza, por el mucho vicio que han tenido con el agua en verano; y si están enjutas, tienen fuerza para pasar el invierno."



Los jardines reales de Aranjuez a finales del siglo XVI según un dibujo que Jean Lhermite (1560-1622), gentilhombre de cámara de Felipe II, incluyó en su Passetemps.

A. *Palacio real*
B. *y* C. *Casas de los antiguos encomenderos*
D. *Acequia larga*
E. *Comedero de los pavos reales*
F. *Puente de Vulpejares*
G. *Cuadradillo de Carabaña*
H. *El caracol*
I. *Las doce acequias*
L. *Puente del Tajo*
M. *Acequia de Toledo*
N. *Casa de los capellanes*
O. *Jardín de flores*
P. *Camino de Ocaña*
Q. *Camino de Antígola*
R. *Río Jarama*
S. *Río Tajo*
T. *Talleres*
2. *Alamos*
Alamos negros
4. *Moreras*
5. *Fresnos*
6. *Nogales*
7. *Almendros*
8. *Sauces*

Transformación de la Amazonía

¿Tendremos una selva húmeda tropical en el año 2000? ¿Sobrevivirán las comunidades indígenas? La respuesta a estas cuestiones dependerá de las acciones políticas que se tomen y de la investigación científica

Emilio F. Morán

El futuro de la Amazonía, la zona más extensa de pluviselva tropical de la biosfera, se halla amenazado. Poseedora de la mayor biomasa vegetal del globo, esa región está sufriendo el acoso destructor de especies únicas, modificaciones del ciclo hidrológico y graves daños socioeconómicos.

No es fácil definir con caracteres distintivos la Amazonía, pues son muchos los intereses que en ella tienen depositados distintas naciones y divergen, en consecuencia, los criterios de aproximación a ese concepto. Se suele estar de acuerdo, no obstante, en que equivale al valle amazónico, es decir, a la cuenca delimitada por el río Amazonas y sus numerosos afluentes. Esa región, de unos cuatro millones de kilómetros cuadrados, equivale al área continental de Estados Unidos o a Europa oriental y occidental juntas, sin incluir la Unión Soviética.

Las poblaciones que los primeros exploradores del siglo XVI encontraron a lo largo del río fueron rápidamente exterminadas por las enfermedades portadas por los europeos. Esas enfermedades, a las que estaban acostumbradas las densas poblaciones de Europa, se convirtieron en eficaces armas de conquista. Los historiadores de ese período de contacto entre el Nuevo y el Viejo Mundo hablan de tasas de despoblación del 50 al 95 por ciento. Las comunidades más sensibles a esas bajas fueron las amazónicas, en razón del típico patrón de dispersión poblacional y la falta de adaptación biológica a las consecuencias epidemiológicas de la alta densidad demográfica. Sabido es que algunas enfermedades exigen una elevada densidad demográfica, pensemos en la varicela o el sarampión, que matan o producen una inmunidad permanente. No conocen otro vector distinto del humano y son incapaces de persistir entre grupos pequeños y aislados entre sí. Por su parte, el tifus y otras enfermedades asociadas a unas condiciones sanitarias deficientes dependen también de la densidad demográfica para su expansión, y raramente afectan a poblaciones nómadas, que evitan la contaminación por la vecindad de los vertederos de asentamientos humanos.

Las poblaciones civilizadas del Viejo Mundo convivían con vacas, ovejas, cerdos, caballos y graneros. Esa familiaridad de trato acarreó nuevas enfermedades y variantes de otras. El trato con ganado vacuno produjo la viruela y la vacuna ("cow-pox"); de la relación entre hombre, ganado vacuno y perros surgió la propagación del moquillo y el sarampión, entre otras afecciones; la relación frecuente entre hombres, cerdos, caballos y aves de corral en contacto con aves silvestres fomentó la dispersión de distintas formas del virus de la gripe ("influenza").

Cuando estas poblaciones del Viejo Mundo, acostumbradas desde el Neolítico a vivir en núcleos de cierta densidad, llegaron al Nuevo Mundo, se hallaban perfectamente capacitadas para sus objetivos conquistadores. El hombre europeo no era ni más alto ni más fuerte que el hombre amazónico, pero poseía una impresionante adaptación genética y fisiológica a las enfermedades endémicas del Viejo Mundo y un sistema inmunitario preparado para soportar enfermedades que, traídas a una región tan aislada y de tan baja densidad de población, causaron una enorme devastación; muchas poblaciones desaparecieron en pocos años.

Las comunidades supervivientes del curso principal se refugiaron en las cataratas de los afluentes. Por contra, los europeos, y más tarde las poblaciones criollas de los países amazónicos, se asentaron en el curso bajo. De esa forma, las poblaciones de la selva y de la sabana tropical, e incluso la propia selva, quedaron relativamente aisladas hasta la segunda guerra mundial.

Con el desarrollo de los países sudamericanos, estadistas y escritores comenzaron a poner sus ojos en la Amazonía. El interés surgía sobre todo de círculos militares, preocupados por consideraciones geopolíticas y el posible peligro de vacío demográfico en las zonas fronterizas del interior de la selva. Esa tensión creció con la pérdida de territorio por parte de Bolivia, Perú y Ecuador en la primera década del siglo XX, con el crecimiento de la actividad cauchera de Brasil, a finales del siglo pasado, y con la ocupación real de esas áreas por brasileños. Más tarde, el descubrimiento de pozos petrolíferos en la selva ecuatoriana indujo a crear avanzadillas militares y asentamientos civiles para proteger ese recurso natural.

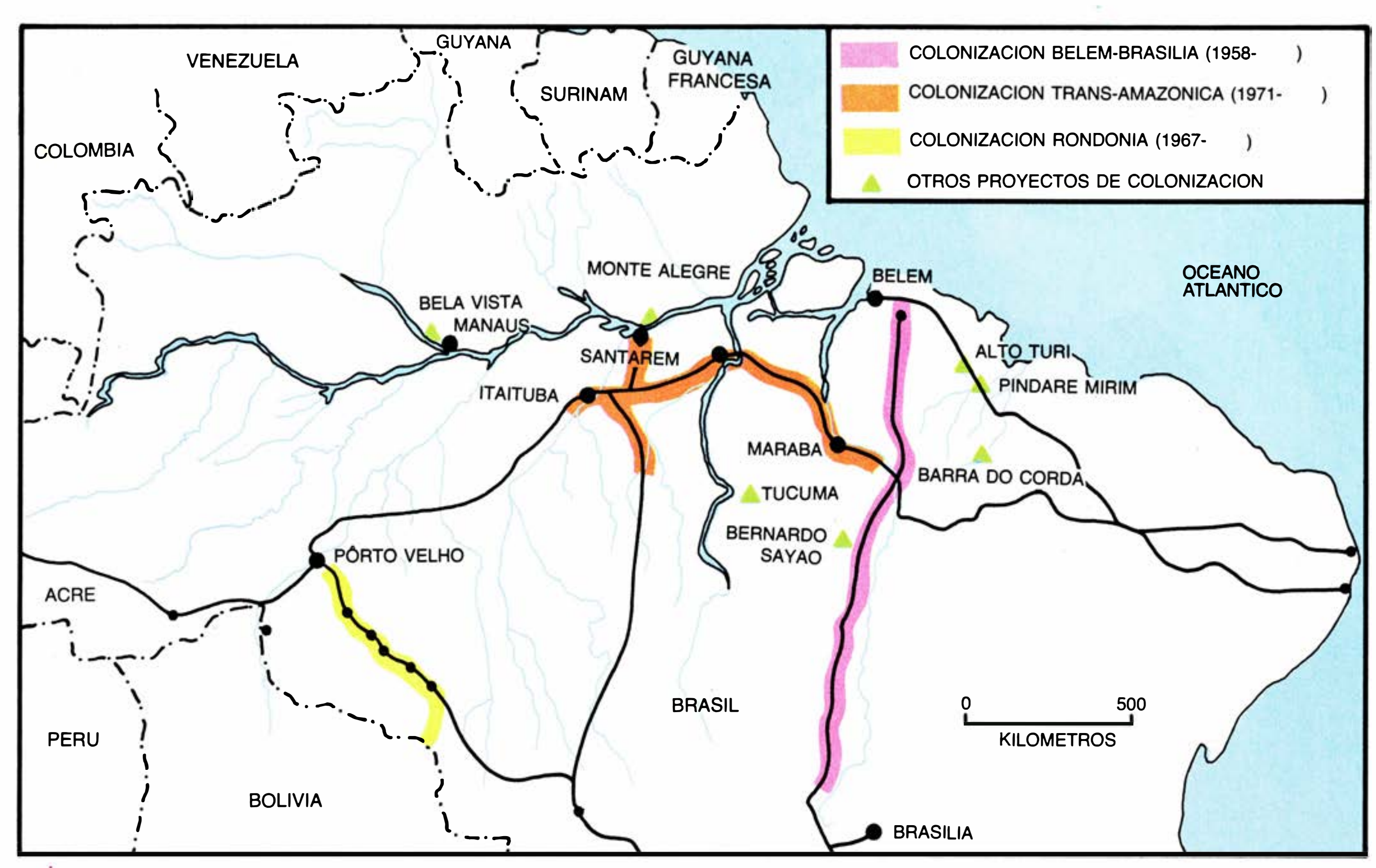
Comenzaron a abrirse carreteras para facilitar los asentamientos civiles y militares. Carreteras que constituyen hoy la vía principal de incursión en el valle amazónico, a pesar de las lluvias torrenciales de la región. Las avanzadillas de campesinos y aventureros van arrasando sectores y reclaman entonces la tierra talada como propia. Son esas comunidades las que suelen establecer los primeros contactos con los núcleos indígenas y, como los exploradores del XVI, les transmiten enfermedades comunes en sociedades de alta densidad, pero mortales para los nativos: gripe, tuberculosis, sarampión y viruela.

El resultado epidemiológico repite una vez más la caída de población del siglo XVI. De más de 230 grupos regis-

EMILIO F. MORAN es catedrático de antropología y ha dedicado más de 15 años al estudio de la Amazonía desde un enfoque multidisciplinario, reflejo de su propia formación. Morán es licenciado en historia brasileña y doctor en antropología agrícola. En ecología de sistemas fue discípulo de Howard Odum; en ecología tropical, de J. Ewel y A. Lugo; en antropología social, de Charles Wagley y, en edafología, de Hugh Popenoe. Desempeña su actividad académica en la Universidad de Indiana.

1. TIPOS DE ECOSISTEMAS DE LA CUENCA AMAZONICA. La Amazonía está formada, sobre todo, por bosques húmedos tropicales. Hay también manglares en la costa, sabanas sometidas a inundaciones periódicas, sabanas semiáridas, de vegetación xerofítica (caatinga) y de vegetación inundable por los cursos principales. Cada año los investigadores van descubriendo nuevos ecosistemas de características únicas, como lo es el bosque Cipó (lianar).

2. PAUTA HABITUAL DE INCURSION en la Amazonía. Los colonos comienzan a deforestar alrededor de sus viviendas de paja como un primer paso en el proceso de explotación agraria. A pesar de la precariedad y humildad de esos habitáculos improvisados, los colonos prefieren construir su propia casa.



3. **DISTINTAS FASES DE COLONIZACION de la Amazonía brasileña. El gobierno promovió la colonización hacia el centro del país y la Amazonía con la construcción de la autopista Belém-Brasília, poniendo en conexión la nueva capital a la principal ciudad amazónica. Dos millones de personas colonizaron la ruta Belém-Brasília en la primera década de su tendido. A partir de 1971 el flujo colonizador cambió con la construcción de la autopista transamazónica, que llegaba hasta las fronteras de Perú y Bolivia. Desde el año 1974, la colonización de Rondonia se ha convertido en el foco de atracción migratoria del país. La población del estado de Rondonia se dobló: de 400.000 habitantes a 800.000, entre 1980 y 1984. La colonización de Acre, antigua área cauchera, es reciente.**



4. **TRANSFORMACION DE LA AMAZONIA, colonizada por gentes procedentes de los países fronterizos y del mismo Brasil. Las casas construidas a lo largo de la carretera no reflejan los orígenes de la población, pues fue el gobierno quien las levantó para los nuevos colonos, sin considerar el tamaño familiar.**

trados en Brasil en 1900, sólo sobrevivían 143, en 1957, y se supone que, en 1988, su número no superaba el centenar. En efecto, grupos con los que se ha entrado recientemente en contacto continúan sufriendo pérdidas de un 10 a un 15 por ciento anual, por culpa de enfermedades comunes. ¿Por qué persiste esa situación? En primer lugar, porque se trata de un impacto difícil de evitar. Si bien es cierto que pueden acometerse campañas de vacunación contra la viruela, no existe medio inmediato de atajar el problema de la gripe en cuanto entran en contacto poblaciones indígenas con forasteros. Se ha comprobado que el impacto epidemiológico comienza incluso antes del propio contacto directo entre las dos poblaciones. Individuos de una población pueden vehicular las enfermedades mortales y traer la ruina a un núcleo indio sin saberlo; los supervivientes, al abandonar su comunidad, llevan la enfermedad a otros núcleos no afectados todavía por el contacto. Una vez infligido el mal, la recuperación de la comunidad depende de su número inicial y de la lenta adaptación indígena a enfermedades endémicas.

Las poblaciones que han establecido un trato perdurable con grupos foráneos y que han resistido la crisis demográfica, llegan a adaptarse con el tiempo. Así ha ocurrido con los Tapirapé, estudiados por Charles Wagley, o los Gorotire Kayapó, investigados por Darrell Posey. No es fácil prever con seguridad qué poblaciones llegarán hasta el año 2000 en la Amazonía, pues depende ello en gran medida de la política de vacunas, separación de los grupos indígenas de las avanzadillas de los colonos, del mantenimiento de condiciones salubres en las comunidades indígenas y de factores epidemiológicos apenas estudiados todavía. Lo que no obsta para que sepamos ya que la atención médica amortigua el descenso demográfico.

Esta última condición reviste especial importancia porque la adaptación epidemiológica de estas poblaciones se ha basado, hasta ahora, en la inestabilidad de los asentamientos tribales. Años atrás era frecuente que las comunidades se trasladaran cada cinco o diez años a nuevas zonas, donde construían nuevas viviendas, dejando atrás bandadas de insectos capaces de infectar al hombre. Muchas de las enfermedades que afligen a las poblaciones de América del Sur no parecen hacer mella en las comunidades de la Amazonía porque los vectores de las enfermedades no conseguían instalarse en los poblados. Carlos Coimbra Jr. acaba de demostrar la presencia del vector de la enfermedad de Chagas en las palmas usadas para la vivienda indígena y la ausencia, sin embargo, de casos de esa enfermedad en poblaciones amazónicas estudiadas hasta el momento. A medida que esas poblaciones cambian su patrón de movilidad residencial y se asientan, corren el peligro de domiciliar con ellas también el vector de Chagas, a no ser que se tomen medidas específicas en contra.

El patrón amazónico de pequeñas comunidades que cambian frecuentemente de lugar de asentamiento constituye una adaptación eficaz para luchar contra agentes patógenos como la infección parasitaria de Chagas, causada por *Tripanosoma cruzi* y transmitida por distintas especies de triatómidos. El comportamiento tradicional de las poblaciones amazónicas ha evitado que el hombre se haya integrado en el ciclo de transmisión de *T. cruzi* y que la enfermedad continúe en su forma enzoótica.

Otra gran transformación que se está registrando en la Amazonía es la causada por la explotación minera. La cartografía amazónica cambió con la aplicación de los métodos de radar, auxiliados con fotografía infrarroja y multiespectral, seguida por vuelos a baja altura y verificación en el propio terreno para llegar a una interpretación definitiva. El proyecto RADAM, como fue denominado, abarca estudios de geología, vegetación y suelos. Hasta ahora, se han estudiado así la Amazonía brasileña y la colombiana, y se han levantado mapas de escala 1:100.000, que han servido de base para la planificación de la región. Esta cartografía, durante la década de los setenta, llevó al descubrimiento de ricas zonas de oro, bauxita y otros minerales. Brasil en particular ha iniciado un programa a largo plazo que transformará la región.

La hidroeléctrica Tucuruí constituye la segunda mayor hidroeléctrica de América del Sur y una de las mayores del mundo, con una capacidad inicial de 3000 megawatt y una capacidad final de 8000 megawatt. La hidroeléctrica distribuirá energía a través de una red de proyectos industriales y urbanos conocidos por Programa Grande Carajás. El Programa comenzó con la explotación de las reservas de hierro descubiertas en Carajás, una serranía rica en hierro de alta pureza. El mineral beneficiado se exportará por ferrocarril de Carajás al puerto de São Luis de Maranhão.

La riqueza minera de la zona es altísima. Se calcula en 18.000 millones de toneladas de hierro, 60 millones de toneladas de magnesio, 1.200.000 millones de toneladas de cobre, 88 millones de toneladas de níquel, 48 millones de tonelada de bauxita, 37.000 toneladas de casiterita y más de 100 toneladas de oro. Para promover su explotación industrial, se ha previsto desembolsar una inversión de 60.000 millones de dólares, que irían al desarrollo de ciudades ya existentes (Belém, San Luis, Barcarena, Marabá e Imperatriz) y a la creación de seis más. A pesar del fuerte endeudamiento exterior del Brasil y la incapacidad del Plan Cruzado por controlar la inflación, resulta obvio que ese país se siente comprometido con el desarrollo de la región de Carajás.

Pero, ¿cuáles serán las consecuencias que se derivarán de la explotación minera? Desde el punto de vista puramente forestal, el beneficio de los minerales influirá menos en la selva circundante que otras prácticas, como el pasto o la agricultura. Las zonas de actividad minera están restringidas y su influencia queda confinada a los alrededores de la explotación, salvo en lo relativo a la limpieza del mineral. La fábrica de alúmina de Vila do Conde, por ejemplo, ha comenzado ya a contaminar el ambiente con los residuos. De proseguir así, y extenderse el fenómeno a otras fábricas, la contaminación de los ríos y de su fauna podría alcanzar proporciones como las sufridas por el Rhin. La pérdida de estas especies, apenas conocidas, sería uno de los grandes atentados contra la humanidad y su futuro sobre el planeta.

No menos grave es el peligro de destrucción de suelo de alta fertilidad de la Amazonía, relativamente escaso, por áreas de desarrollo urbano. Se han construido ciudades en suelos excelentes para la agricultura, cuando había a poca distancia otros más pobres y aptos para la edificación. Se han multiplicado los casos en que los colonos han arrasado suelos de alta fertilidad para convertirlos en pastos, en tanto que otros colonos han cultivado suelos pobres y ácidos para la agricultura. Por toda la Amazonía se han introducido buscadores de oro, que remueven tierras y suelos, destruyendo la frágil estructura del suelo. Esa actividad es responsable, además, de la incidencia de paludismo en los últimos 15 años. (Los grandes claros abiertos en la búsqueda de minerales crean medios adecuados para

LIMITACIONES DEL SUELO	HECTAREAS	
	MILLONES	PORCENTAJE
DEFICIENCIA EN FOSFORO	436	98
TOXICIDAD POR ALUMINIO	353	73
ESTRES POR SEQUIA	254	53
PERDIDAS DE RESERVAS DE POTASIO	242	50
DRENAJE DEFICIENTE	116	24
ALTA FIJACION DE FOSFORO	77	16
BAJA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO	64	13
EROSION ELEVADA	39	8
OTRAS LIMITACIONES	32	7
PENDIENTES POR ENCIMA DEL 30 %	30	6
LATERIZACION DEL SUELO EXPUESTO	21	4

5. PRINCIPALES LIMITACIONES DE LA AMAZONIA dejada a sus expensas. Las deficiencias de los suelos de la Amazonía son de naturaleza química en su mayoría. Pueden corregirse con fertilizantes, una mejor gestión y una apropiada selección de los cultivos y prácticas agrícolas, atendiendo al reciclaje de los nutrientes. (Basado en Pedro Sánchez: *Management of Acid Soils in the Humid Tropics of Latin America.*)

las larvas de anofélidos.) Y lo que es más importante: deben protegerse recursos bióticos y ecosistemas únicos, amén de racionalizar la explotación del medio para agricultura y pastos.

La otra transformación que está sufriendo la Amazonía es de orden ecológico y demográfico. Nos hemos referido ya a la invasión paulatina por gentes de otras regiones. Las cifras, altísimas, aunque carecemos de estudios sobre el tiempo de permanencia de los inmigrantes. Las áreas de mayor presión demográfica en la Amazonía se encuentran en la periferia: Alto Amazonas de los países andinos y zonas de transición ecológica entre la sabana y la selva tropical brasileña. La única área de alta presión demográfica que se ubica en pleno interior de la selva húmeda tropical es la constituida por el estado de Rondonia. Desde el año 1970, han ido llegando unas 5000 personas cada mes para ocupar la tierra. El propio Banco Mundial ha financiado el asfaltado de la carretera que corta la región y que une Porto Velho con Manaus. Estimaciones recientes de la deforestación de Rondonia señalan que, entre 1970 y 1987, dicho estado perdió el 26 por ciento de su selva.

Todo parece indicar, sin embargo, que la selva amazónica no se ve amenazada sólo por la invasión humana. Todos los municipios de la región amazónica han perdido población de 1970 a 1980, salvo el estado de Rondonia y las ciudades de Belém y Manaus. Lo que estamos observando en la Amazonía es un proceso de migración interna de las zonas rurales a las ciudades, instado por el establecimiento de oficinas gubernamentales y la promesa de empleo en el sector público. Se trata de un fenómeno que se repite también en el territorio amazónico de Venezuela, donde atraviesa por tres etapas: en primer lugar, una concentración de las poblaciones indígenas, procedentes de sus comunidades en la selva, en asentamientos donde conviven con criollos y aprenden así los rudimentos de la economía, el uso de la moneda y las primeras nociones de la cultura venezolana; en un segundo estadio, se trasladan a Puerto Ayacucho, capital del territorio federal, donde viven en barrios mixtos y avanzan en sus conocimientos de la nación; por último, parten hacia otras regiones de Venezuela con mayores posibilidades de empleo.

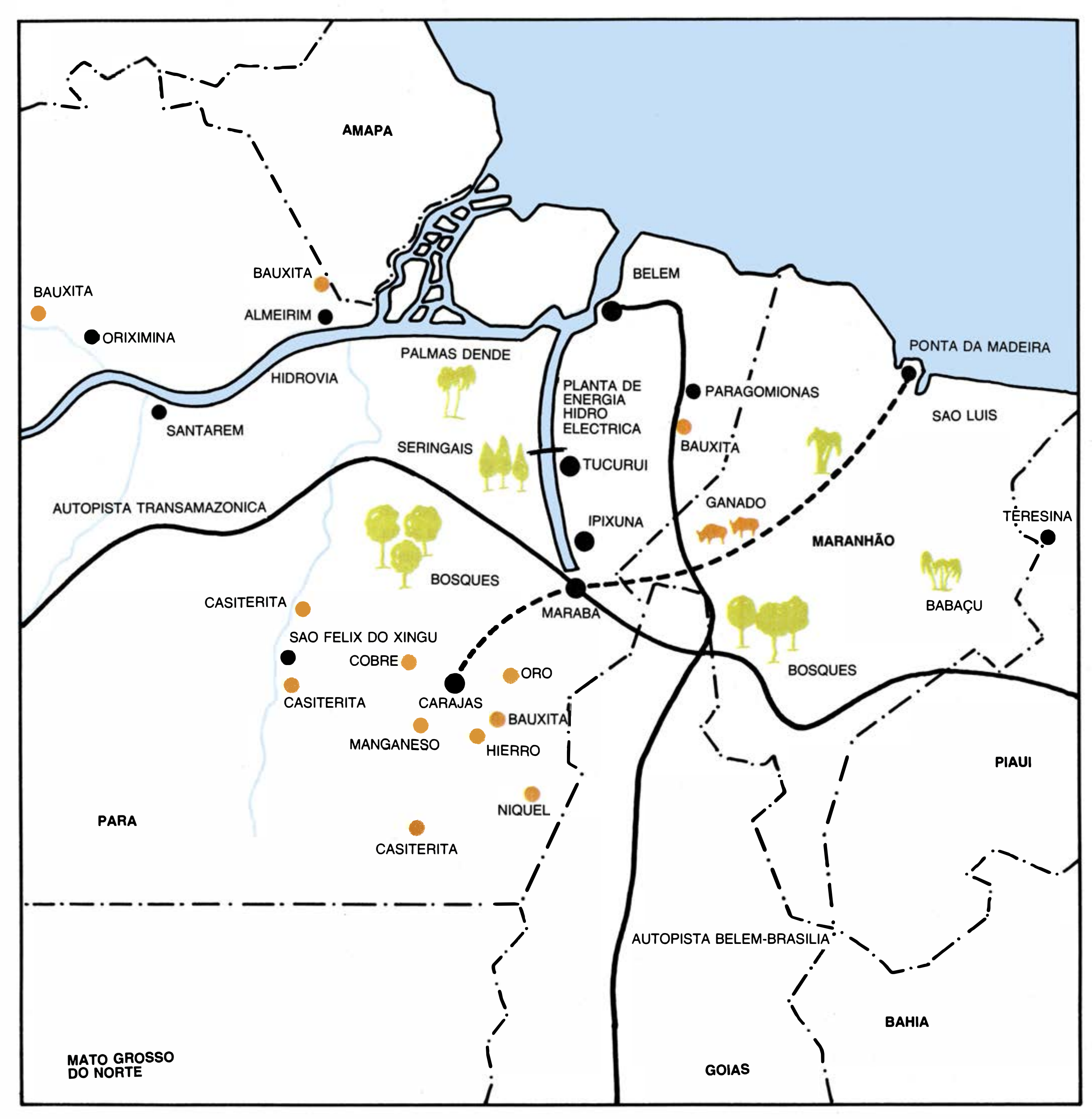
Significa ello que el territorio federal amazónico se está urbanizando y se van despoblando las zonas rurales. Tenemos, pues, una caída de población por culpa de las enfermedades traídas por nuevos colonos y un abandono de sus lugares de origen de los supervivientes, que habitarán a lo largo de una generación o dos en barrios de deficientes condiciones higiénicas, lejos de su medio selvático natural. En esas ciudades insalubres se producirá el tránsito a nuestras enfermedades, con un elevado coste en vidas humanas.

El vacío demográfico resultante se ocupa en parte por nuevos inmigrantes que constituyen, primero, poblados aislados, crean luego poblados intermedios y llegan por último a las urbes propiamente dichas. Estos inmigrantes proceden de la sierra en los países andinos, del sur y centro en Brasil, o de Colombia y Brasil en Venezuela. Se trata de gentes que traen sus propios sistemas agrícolas, muchas veces mal adaptados a la ecología de la región. Así, lo acostumbrado por los habitantes de la zona era limpiar áreas pequeñas de una hectárea cada año, que cultivaban durante dos o tres años y que abandonaban luego por una década o más para que se recuperase; por contra, los nuevos inmigrantes arrasan zonas más extensas y no piensan en un proceso de rotación, sino en uno permanente.

No se ve claro el futuro de una agricultura permanente en la Amazonía. Por un lado, es indudable que el suelo

ANALISIS DEL SUELO			
CARACTERISTICAS	VALOR MEDIO	RANGO	MUESTRAS
pH	5,76	4,20-7,30	23
ARCILLA (PORCENTAJE)	19,90	3,69-43,18	23
FOSFORO DISPONIBLE (PARTES POR MILLON)	4,50	2,00-10,00	23
POTASIO DISPONIBLE (MILIEQUIVALENTES/100 CC)	0,20	0,08-0,046	23
CALCIO DISPONIBLE (MILIEQUIVALENTES/100 CC)	4,14	0,49-12,72	23
MAGNESIO DISPONIBLE (MILIEQUIVALENTES/100 CC)	0,95	0,30-2,60	23
ALUMINIO DE INTERCAMBIO DISPONIBLE (MILIEQUIVALENTES/100 CC)	0,38	0,00-4,43	23
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES (MILIEQUIVALENTES/100 CC)	5,66	1,86-15,49	23

6. ANALISIS DEL SUELO en una zona de colonización de Carajás. Los suelos de la Amazonía no son todos pobres y ácidos. Hemos descubierto determinadas zonas del valle del río Xingú, en Carajás, y en Rondonia, que presentaban suelos de calidad media a superior. La actividad agrícola debería orientarse hacia esos lugares y protegerse las zonas pobres de toda deforestación que permitan mantener un banco biológico.



7. LA AMAZONIA NO ES YA UN AREA VIRGEN. El descubrimiento de yacimientos petrolíferos en Perú, Ecuador y Colombia, el potencial beneficio de los recursos minerales y las vastas extensiones dedicadas al cultivo y a pastos dan claro testimonio de la transformación que está sufriendo la Amazonía.

de la región es, en gran parte, ácido y muy pobre en nutrientes; por otro, se trata de suelo con excelente textura y que rinde buenas cosechas cuando se dispone de los fertilizantes adecuados. Ahora bien, si la agricultura intensiva es técnicamente viable, ¿por qué hay tan pocos ejemplos de éxito? Nos encontramos con distintos tipos de obstáculos. No hay mapas de suelos de alcance restringido, como el pertinente a una explotación agraria familiar. La mayoría de los agricultores siguen prácticas que no se adecuan a las condiciones de la región, por lo que las cosechas son muy pobres. E incluso cuando la cosecha ha sido buena se pierde hasta un 70 por ciento por falta de silos ajustados a las elevadas temperaturas y humedad de la región. Por último, la vastedad de la región y la extrema dispersión de los centros de producción dificultan el mantenimiento de las carreteras en buen estado y encarecen el transporte de los productos hasta los centros de consumo.

Así las cosas, el inmigrante prefiere arrasar la selva con la esperanza de revender el terreno, ya "mejorado", a otro que venga detrás suyo. El agente que ha acelerado el proceso de deforestación no ha sido tanto el colono cuanto la banca, con cuyo crédito se han contratado peones para limpiar extensiones mayores. Sin ese apoyo financiero, el colono no podría deforestar más de tres hectáreas, las necesarias para su alimentación. En un estudio llevado a cabo (en 1984) en el área de Carajás, encontré una correlación entre la cantidad de crédito y la zona deforestada, con un coeficiente de 0,73, lo que venía a sugerir que el crédito concedido para plantar, cultivar y cosechar se estaba utilizando, casi ínte-

gramente, en deforestar. Lo mismo ocurrió, en una escala mucho mayor, en la década de los setenta. Los incentivos fiscales —en virtud de los cuales se podía invertir hasta el 50 por ciento del impuesto sobre la renta en proyectos de desarrollo en la Amazonía— preveían un subsidio por medio del cual el gobierno contribuía con 75 centavos por cada dólar de inversión. Lo que resultó de ello fue la deforestación de grandes zonas del sur del Pará (Brasil) y la conversión de selva tropical en zonas de pastos. Cuando se vio el escaso rendimiento de esas inversiones y el uso espúreo que de ellas hacían las compañías creadas para atraer el capital previsto por los incentivos, el gobierno cortó la aportación. En cuanto se suspendió el subsidio gubernamental, se detuvo también el avance de la frontera ganadera. Lo mismo parece haber ocurrido en Rondonia, otra zona brasileña donde las ayudas bancarias a las plantaciones de cacao han provocado las tasas más altas de deforestación hasta hoy vistas.

Una transformación que no suele entrar en la bibliografía sobre la Amazonía es su propio cambio, de región desconocida a objeto de estudio. Todavía en 1970, la Amazonía era una región bastante ignorada, que se citaba como la "muralla verde", el "infierno verde" e incluso "devoradora de civilización". Con el tendido de carreteras, llegó también el interés de los investigadores, que coincidió, en otro orden, con la explosión del número de posgraduados universitarios. Expertos en ciencias sociales y naturales colaboraron para deshacer el mito que envolvía a la Amazonía. La medición pluviométrica demostró la gran variabilidad dentro de la región (entre 1700 y 4300 milímetros al año) y la existencia de períodos de sequía, capaces de afectar gravemente el manto vegetal. El estudio isotópico de la lluvia demostró que la mitad de la precipitación resulta del reciclaje de evapotranspiración y no se debe exclusivamente al vapor que procede del Atlántico, según se venía suponiendo; ello puso sobre el tapete un motivo de grave preocupación: el papel de la selva en el ciclo hidrológico de la región y la relación entre la deforestación y la sequía en la Amazonía y zonas circundantes.

La pobreza de los suelos de la Amazonía, concepto en el que muchos investigadores se apoyan para negar su utilidad agrícola, se conoce cada vez mejor. El mito de los suelos pobres se desvanece cuando observamos que los suelos ácidos y escasos en nutrientes equivalen a suelos sometidos a cultivo intensivo del sureste de los Estados Unidos y del sureste de China; o cuando vemos que hay suelos de alta fecundidad (alfisoles) cuya extensión no es menor que varios países de Europa Occidental, como Portugal, Austria y Alemania; o cuando vemos los resultados experimentales de la investigación agronómica.

Los desastres agrícolas o forestales tienen su explicación natural. Así, por ejemplo, el fracaso de las plantaciones caucheras de Henry Ford, en la década de los treinta, debióse en gran parte a la falta de resistencia de las plantaciones a las enfermedades endémicas y a la homogeneidad de las variedades plantadas. El fracaso de las plantaciones de *Gmelina arborea* por Emil Ludwig, en los años setenta, siguióse de la deforestación mecánica del área plantada y la consiguiente compactación del suelo, pérdida de materia orgánica y falta de aclimatación previa de ese cultivo en la Amazonía. El fracaso de tantas colonizaciones en la Amazonía se explica por las promesas utópicas de los gobiernos a los colonos y a la falta de adaptación del hombre al medio.

A lo largo de las dos últimas décadas hemos asistido a una verdadera explosión de investigaciones científicas sobre la Amazonía. Pero siguen siendo insuficientes, ante la vastedad de la región y el grave peligro que se cierne sobre ella. No bastan dos o tres trabajos para un tema de tanta complejidad. La comunidad científica internacional no debiera limitarse a observar cómo transcurre la transformación de la Amazonía, sino que debería contribuir a la protección de ese importante ecosistema por medio de la investigación y la acción práctica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DEVELOPING THE AMAZON: THE SOCIAL AND ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF COLONIZATION ALONG THE TRANSAMAZON HIGHWAY. Emilio F. Morán. Bloomington; Indiana University Press, 1982.

DILEMMA OF AMAZONIAN DEVELOPMENT. Dirigido por Emilio F. Morán. Boulder; Westview Press, 1983.

CHANGE IN THE AMAZON BASIN. Dos volúmenes. Dirigido por John Hemming. Manchester; Manchester University Press, 1985.

IN THE RAINFOREST. Catherine Caufield. Chicago; University of Chicago Press, 1986.

KEY ENVIRONMENTS: AMAZONIA. Dirigido por Tom Lovejoy y G. Prance. Londres; Pergamon Press, 1986.

Oscilaciones cuasiperiódicas en fuentes celestes de rayos X

Ni del todo periódicas, ni completamente aleatorias, las fluctuaciones en intensidad de la radiación X nos orientan sobre la naturaleza de las fuentes de rayos X, que se agrupan cerca del centro de nuestra galaxia

Michiel van der Klis

Buena parte de lo que sabemos sobre las fuentes de rayos X de nuestra galaxia se lo debemos a ciertas regularidades: las que muestra la intensidad de emisión en su variación con el tiempo. Aumentos y disminuciones cíclicas de la intensidad indican que una estrella está en órbita en torno a la fuente de rayos X, eclipsándola periódicamente. Por otra parte, los pulsos de rayos X emitidos a intervalos uniformes e inferiores a pocos segundos manifiestan que la fuente es un objeto de alta densidad, una estrella de neutrones, fuertemente magnetizada y que se halla girando rápidamente. Erupciones intermitentes de rayos X señalan también la presencia de una estrella de neutrones, pero en este caso de una en cuya superficie se producen grandes explosiones termonucleares.

El análisis fino de los detalles de esas regularidades permite que los astrónomos descubran la física de las fuentes galácticas de rayos X. Después de un cuarto de siglo de observaciones, las fuentes más intensas de rayos X del cielo, muchas de ellas alojadas en el bulbo central de nuestra galaxia, no parecían presentar ninguna regularidad. Mientras los secretos de otras fuentes de rayos X, más débiles, se iban descubriendo, las fuentes más intensas del bulbo galáctico seguían rodeadas de misterio.

MICHIEL VAN DER KLIS se halla adscrito al Observatorio *EXOSAT*, del Centro Europeo de Investigación y Tecnología Espacial de la Agencia Espacial Europea (ESTEC) con sede en Noordwijk, Holanda. Estudió en la Universidad de Amsterdam, donde se doctoró en 1983, y prosiguió su labor investigadora en ESTEC. Por el descubrimiento de las oscilaciones cuasiperiódicas de las fuentes celestes de rayos X, van der Klis recibió, en 1987, el premio Bruno Rossi de la Sociedad Astronómica Americana.

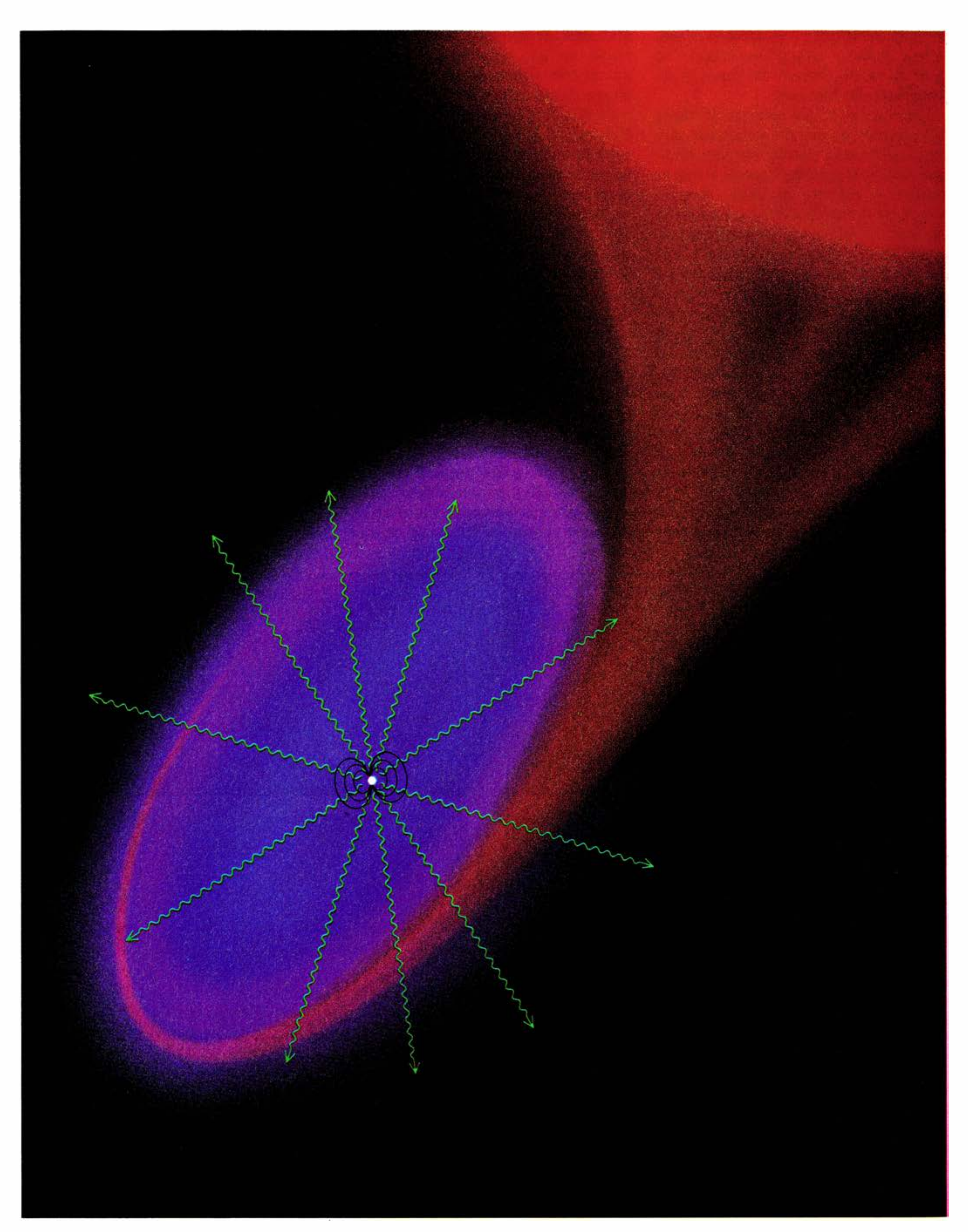
Por eso, el autor y otros colegas suyos no pudieron reprimir su excitación cuando, entre 1984 y 1985, descubrieron que sus observaciones de una de las fuentes más brillantes del bulbo galáctico, GX5-1, mostraba un tipo peculiar de variación regular en la intensidad de su emisión rayos X. (El nombre GX5-1 remite a la posición del objeto en el cielo: cinco grados este y un grado sur con respecto al centro galáctico.) Se trabajaba con el observatorio de rayos X *EXOSAT*, un satélite de la Agencia Espacial Europea; esas observaciones formaban parte de un programa de exploración preparado y realizado por Fred Jansen, del Laboratorio para la Investigación Espacial de Leiden, Jan van Pardijs y Edward P.J. van den Heuvel, de la Universidad de Amsterdam, Walter H. G. Lewin, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, Joachim Trümper y Mireck Sztajno, del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre, en Munich, y el autor de este artículo.

Las variaciones observadas por nosotros en la intensidad de las emisiones de rayos X procedentes de GX5-1 constituían motivo de especial sorpresa, por cuanto no se trataba de variaciones estrictamente periódicas. Para cualquier observación que examináramos, el intervalo temporal entre dos máximos de intensidad de rayos X se aproximaba a los 0,03 segundos; pero con frecuencia se alargaba o acortaba algo. Este tipo de fluctuaciones no totalmente periódicas suelen denominarse oscilaciones cuasiperiódicas (QPO, por sus iniciales en inglés). Si establecemos una analogía entre la variabilidad de GX5-1 y una fuente de sonido cualquiera nuestra sorpresa se le hará más familiar al lector: en vez de "oírse" como un tono puro a una frecuencia dada, las variaciones "sonarían" como las producidas por la rotura de un vaso. Nuestra excitación se avivó cuando se comprobó que las oscilaciones eran muy rápidas. Eso indicaba un origen probablemente muy cercano a un objeto celeste compacto, justo allí donde fuerzas gravitatorias intensas provocan que los fenómenos se desencadenen con rapidez.

¿Por qué buscábamos oscilaciones rápidas en fuentes de rayos X del bulbo galáctico? Para contestar la pregunta, es preciso referirse a algunos de los objetos descubiertos en los 25 años de astronomía de rayos X que nos han precedido.

Salvo contadas excepciones, se cree que las fuentes intensas de rayos X en nuestra galaxia son sistemas binarios, o estrellas dobles, constituidos por una estrella compacta, formada por colapso gravitatorio (sea una estrella de neutrones o un agujero negro), en órbita alrededor de otra estrella, más o menos normal. Este objeto colapsado representa el estado final de la evolución para estrellas varias veces más masivas que el Sol. Se llega a esta situación cuando la estrella no puede generar calor suficiente para compensar la fuerza de compresión gravitatoria.

Tal como su nombre indica, una estrella de neutrones está formada, en su mayor parte, por un empaquetamiento denso de esas partículas. Su masa, entre una y dos veces la solar, se halla comprimida en una esfera de sólo veinte kilómetros de diámetro. (Por contra, la masa solar ocupa una esfera cuyo diámetro supera el millón de kilometros.) Un agujero negro es la forma más extrema del colapso gravitatorio estelar; un agujero negro cuya masa quintuplicara la solar poseería un diámetro eficaz de tan sólo unos treinta kilometros. La combinación de un tamaño restringido y una masa enorme implica la existencia de un campo gravitatorio muy intenso que rodea la es-



1. LOS SISTEMAS BINARIOS formados por una estrella de neutrones (*blanca*) y una compañera más o menos normal (*roja*) permiten explicar la mayoría de las fuentes de rayos X que se observan en el firmamento. Cuando una estrella más masiva que el Sol varias veces colapsa bajo su propio peso, forma una estrella de neutrones. El enorme campo gravitatorio generado por la estrella colapsada arranca plasma, o materia ionizada, de su compañera normal (que puede ser millones de veces mayor) para formar un disco de acreción. Desde este disco de acreción, el plasma cae, describiendo un movimiento espiral, hacia la superficie de la estrella de neutrones, alcanzando una velocidad cercana a la de la luz. En el momento del impacto, puede convertirse en energía hasta un 20 por ciento de la masa del plasma, sobre todo en forma de rayos X (*verde*). Durante su proceso de creación, una estrella de neutrones puede dotarse de un campo magnético muy intenso (*líneas negras*) que, aunque va degradándose, puede tardar más de 100 millones de años en desaparecer. Por tanto, la intensidad del campo magnético de una estrella de neutrones constituye, para los astrónomos, un buen indicador de la edad que tiene dicho objeto celeste. (Recreación de G. Retseck.)

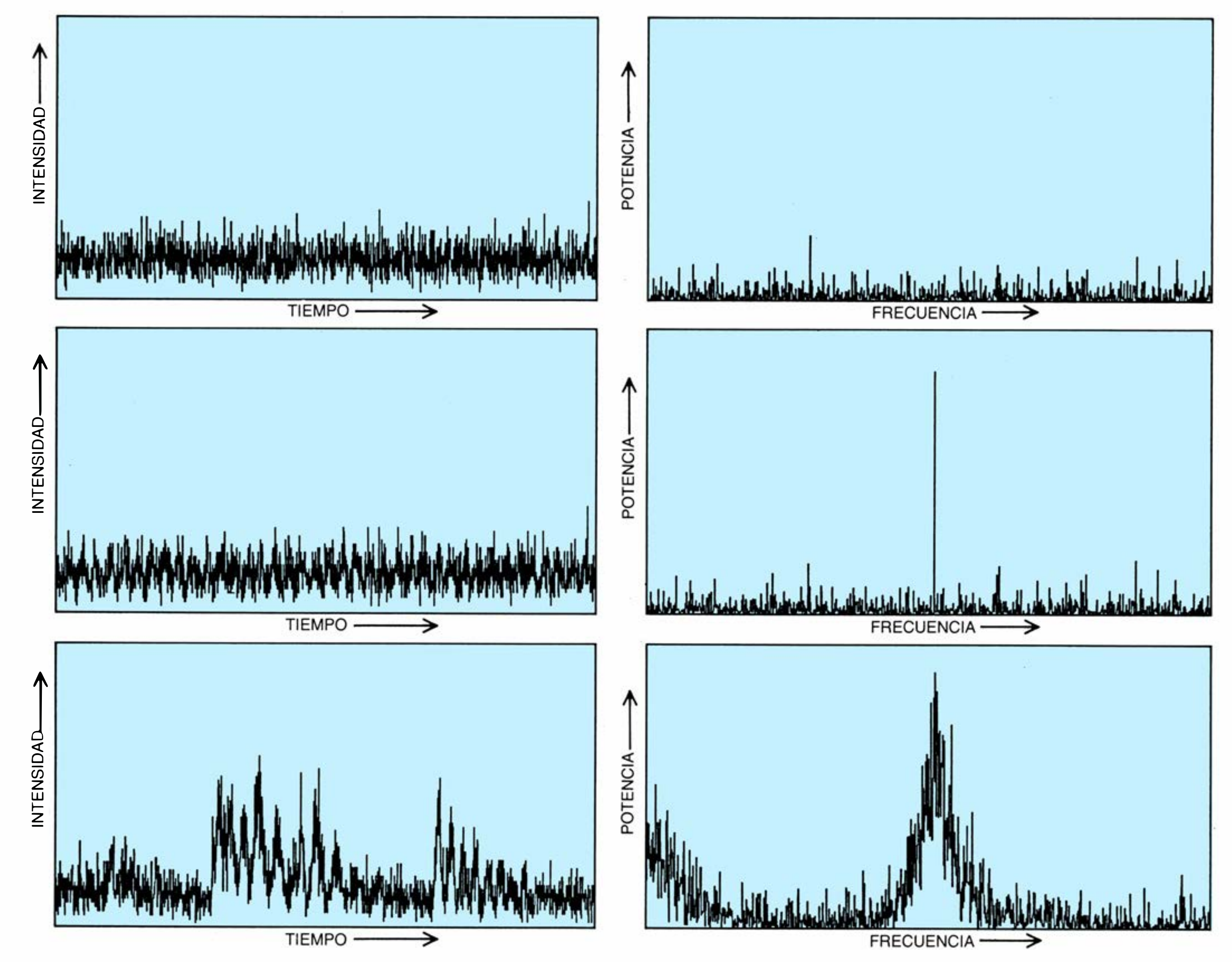
trella de neutrones o el agujero negro. A ese intenso campo gravitatorio se debe la fuerte emisión de rayos X de estos sistemas binarios.

En muchas de las binarias de rayos X brillantes, la estrella colapsada gira muy ceñida a la estrella normal, tanto que su propia gravedad puede arrancar plasma, o materia ionizada, directamente de las capas exteriores de dicha compañera. El plasma gira entonces alrededor de la estrella colapsada y forma un disco en rotación, el disco de acreción, que tiene por centro la estrella colapsada. Desde el disco de acreción, el plasma se precipita en espiral hacia la superficie de la estrella. En su caída, la materia se acelera hasta velocidades próximas a la de la luz y se calienta hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 100 millones de grados Kelvin. El resultado de ese proceso es la liberación de grandes cantidades de energía en forma de rayos X.

La acreción sobre un objeto compacto constituye uno de los métodos más eficientes de producir radiación. Si el objeto es una estrella de neutrones, puede convertirse en energía más del 20 por ciento de la masa del plasma (de acuerdo con la famosa relación de Einstein, $E = mc^2$). Si el objeto es un agujero negro, el rendimiento puede llegar hasta un 40 por ciento. Para hacerse una idea de lo que esto representa, debe señalarse que el proceso más energético que puede darse en la Tierra, la explosión termonuclear, posee una eficiencia de conversión de masa en energía inferior al 1 por ciento. Una fuente brillante de rayos X, como GX5 -1 captura alrededor de 1000 millones de toneladas de plasma por segundo y emite tanta energía en forma de rayos X en un segundo como lo hace el Sol, en todo el intervalo espectral, durante varios días.

Importa distinguir entre sistemas binarios de rayos X "jóvenes"(con menos de 10 millones de años de existencia) y sistemas binarios "viejos" (cuyo origen se remonta cientos de millones de años atrás): el plasma interactúa de manera distinta con la estrella de neutrones en uno y otro caso. Los sistemas binarios de rayos X jóvenes se hallan cerca de los brazos espirales de la galaxia, allí donde las estrellas nacen. Las componentes no compactas de estos sistemas son estrellas gigantes, blanco azuladas, cuya masa decuplica la solar. Por esta razón, tales sistemas se conocen también como binarias de rayox X de gran masa.

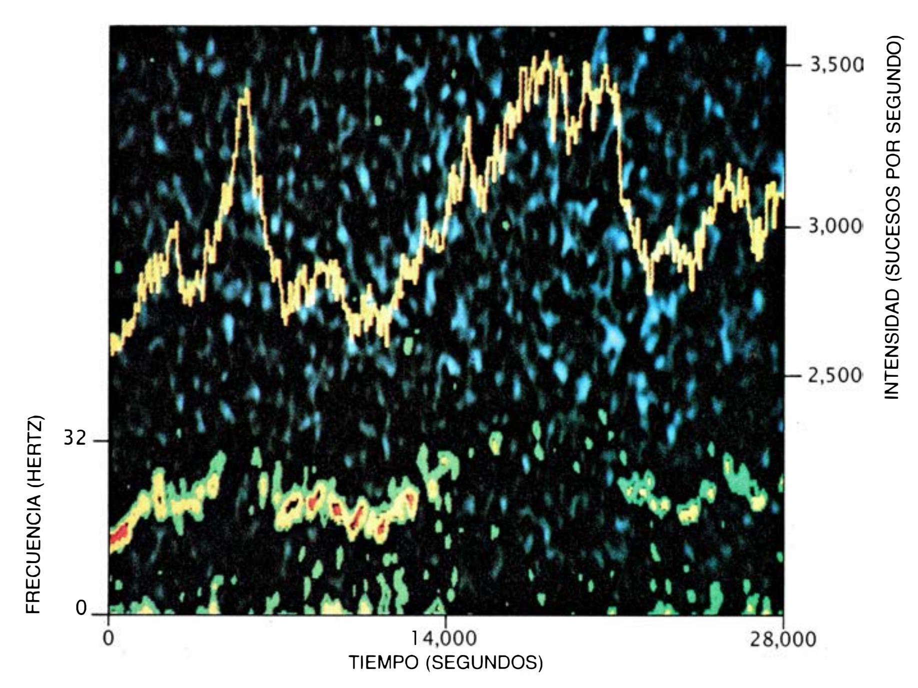
Los sistemas binarios de rayos X viejos, entre los cuales se encuentran todas las fuentes QPO, pueden descubrirse en cualquier parte de nuestra galaxia y no necesariamente en las regiones de formación estelar. Considerada la vida relativamente corta de las estrellas masivas, la masa de la estrella no compacta de los sistemas viejos será pequeña (es decir, menor que la de nuestro Sol). Esto se ha comprobado para algunos sistemas binarios viejos de rayos X, que pueden observarse con



2. MEDIANTE El ANALISIS DE FOURIER, los astrónomos desmenuzan las variaciones en intensidad de las señales de rayos X de un objeto celeste (*izquierda*), descomponiéndolas en las muchas frecuencias que las configuran. Se obtiene así el espectro de potencias (*derecha*). Los astrónomos que trabajan en rayos X pueden distinguir entre el fondo de rayos X, es decir, "ruido" (*arriba*), oscilaciones periódicas (*centro*) y oscilaciones cuasiperiódicas, o QPO (*abajo*).

telescopios ópticos. De ahí que los sistemas viejos se conozcan también como binarias de rayos X de masa pequeña.

Durante el colapso gravitatorio que da lugar al nacimiento de una estrella de neutrones, los efectos de dinamo pueden generar campos magnéticos muy intensos (alrededor de 10^{12} gauss, más de un billón de veces el de la Tierra). Un campo magnético de estas características perturba el movimiento del plasma en el disco de acreción que se halla a varios miles de kilómetros por encima de la superficie de la estrella de neutrones. Así, dentro de la magnetosfera de la estrella, el plasma se ve obligado a moverse a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético, para caer luego, sobre la estrella de neutrones, cerca de los polos magnéticos. En virtud de ello, se forman dos "manchas calientes" (una para cada polo magnético) en la superficie de la estrella; desde estas regiones se emiten la mayor parte de rayos X. Si las manchas calientes no se hallan en el eje de rotación de la estrella, se forman entonces dos anchos haces de rayos X que emanan de tales manchas y que giran con la estrella. Para un observador situado en la Tierra, un púlsar de rayos X, que no otra cosa es la estrella de neutrones con estas características, se manifestaría a través de la emisión de pulsos regulares de rayos X; lo que recuerda el haz de un faro en rotación que se observa como una luz pulsante. Por tanto, siempre que se detectan pulsaciones de rayos X de este tipo, hay que presumir la presencia de un sistema binario, una de cuyos componentes es una estrella de neutrones de rotación rápida y fuertemente magnetizada.



3. ESPECTRO DINAMICO DE POTENCIA de GX5-1. Muestra que la intensidad de la radiación X emitida (*trazo superior*) guarda relación con la frecuencia de sus QPO (*trazo inferior*). Cuando la intensidad de la fuente es baja, se ven QPO de diferentes frecuencias cerca de los 20 hertz. (La intensidad de las QPO viene indicada por el color del trazo inferior.) Cuando la intensidad de la emisión de rayos X aumenta, la frecuencia de las QPO lo hace también, hasta que la intensidad alcanza su máximo; en ese momento las QPO parecen desaparecer. La razón de tal "desaparición" reside en la potencia de las QPO, que se reparte sobre un intervalo de frecuencias, perdiéndose en el fondo de ruido de los rayos X. (Figura obtenida por el autor.)

Además de generar gran cantidad de rayos X, la acreción de materia hacia la estrella de neutrones comporta otra importante consecuencia. Cuando el plasma alcanza la superficie de la estrella, transfiere su movimiento a ésta, forzándola a acelerar su giro en la misma dirección que circula el plasma. La estrella deja de ganar momento angular cuando gira con la velocidad del plasma que la orbita. Se dice entonces que está rotando con su periodo de equilibrio. Si la estrella girase más deprisa que su periodo de equilibrio, lanzaría materia al espacio e iría reduciendo su velocidad de rotación.

Si el campo magnético de la estrella adquiriese intensidad suficiente para que se formara una magnetosfera, la velocidad orbital del plasma situado justo en el límite de la misma determinaría el periodo de equilibrio. La razón estriba en que, en el interior de la magnetosfera, el plasma no se halla ya en una órbita de caída libre, sino que está ligado a las líneas de campo, que, a su vez, se encuentran rígidamente conectadas con la estrella. Para un radio magnetosférico de varios miles de kilómetros (típico de un púlsar de rayos X en un sistema binario joven), el período de equilibrio es del orden de unos cuantos segundos. Se han observado muchos púlsares de rayos X con tales períodos.

La mayoría de los astrofísicos piensan que el campo magnético intenso de una estrella de neutrones no puede durar por siempre, sino que se va disipando gradualmente. Apoyándose en ello, se espera que la estrella de neutrones de un sistema binario viejo tenga un campo magnético débil, en la hipótesis de que lo hubiera, y, como mucho, disponga de una pequeña magnetosfera. (En este sentido, las binarias de rayos X que contienen una estrella vieja de neutrones se asemejan a los sistemas que incorporan agujeros negros: es imposible que un agujero negro posea un campo magnético intenso.)

Al no existir una gran magnetosfera que envuelva la estrella de neutrones de un sistema binario viejo, la parte interna del disco de acreción se extiende hasta casi tocar la superficie de la estrella. En esta situación, el plasma que orbita justo por encima de la superficie estelar determina el período de equilibrio. Ahora bien, la velocidad orbital del plasma aumenta a medida que decrece el radio orbital; cabe, pues, suponer que los periodos de equilibrio de los sistemas viejos sean extremadamente cortos —del orden de un milisegundo.

De acuerdo con la descripción de los sistemas binarios de rayos X que acabo de esbozar, que es la comúnmente aceptada, habrá estrellas de neutrones que giren muy deprisa, en binarias de rayos X viejas. El autor y sus colegas andaban buscando períodos de rotación del orden del milisegundo en tales sistemas cuando observábamos GX5-1. Tal como se vio más tarde, no estábamos observando las rápidas velocidades de rotación predichas por los modelos; la verdad es que todavía no se han registrado.

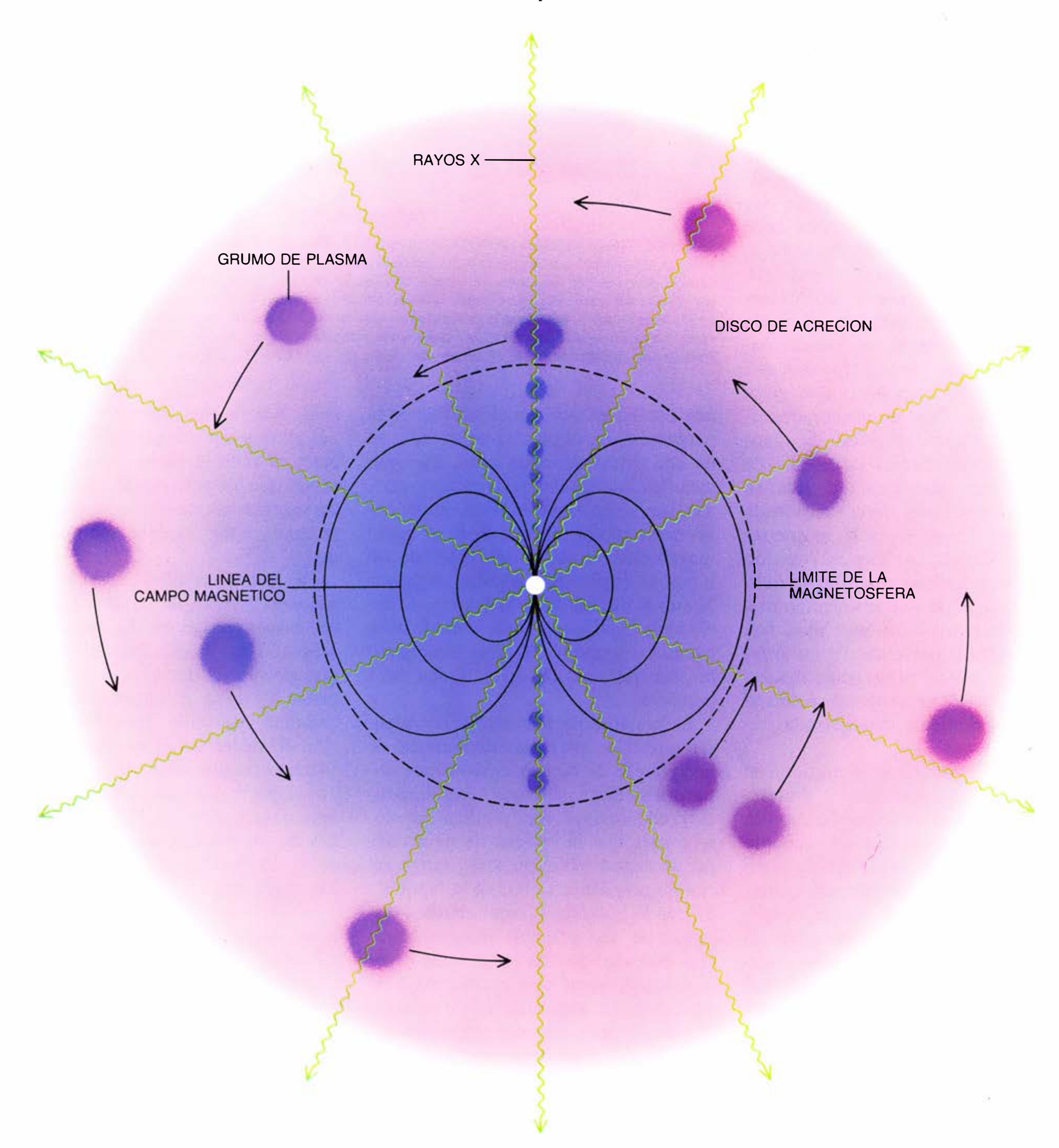
Sin embargo, tampoco fue una sorpresa, pues el campo magnético que posibilita una rotación rápida impide que los astrónomos la detecten. Sin un campo magnético intenso, no se puede canalizar el plasma hacia los polos magnéticos; no hay manchas calientes en rotación y, en consecuencia, no hay pulsaciones visibles de rayos X. Aunque se predice que las pulsaciones de los sistemas viejos deben ser rápidas, se predice también que han de ser débiles e indistinguibles.

El mejor método para aislar esas pulsaciones, rápidas y débiles, del fondo

de ruido de rayos X sigue siendo el análisis de Fourier. Esta vieja técnica permite construir el espectro de potencias de las variaciones en la intensidad de los rayos X [*véase la figura 2*]. Un espectro de potencias permite estimar, para gran número de frecuencias, la potencia de todas las señales que fluctúan, dentro de un pequeño rango de frecuencias (denominado comúnmente "bin" o empaquetamiento), alrededor de cada una de las frecuencias consideradas.

Si la radiación X que proviene de una parte del cielo varía periódicamente en intensidad, la variación se manifestará en el espectro de potencias mediante un estrecho pico en el empaquetamiento que contiene las variaciones a una frecuencia determinada. Cuanto más largo sea el período de observación, con mayor claridad se ve el pico respecto al ruido en los empaquetamientos de su entorno. Mientras que el ruido se reparte en todos los empaquetamientos, toda la potencia de la señal periódica se concentra en uno solo. Por esta razón, resulta ventajoso construir los empaquetamientos muy estrechos; en efecto, al comprimir la potencia de una señal periódica, se obtiene una señal correspondiente mayor en el máximo. Esto facilita la detección de una señal, muy débil pero regular, de entre el ruido de fondo.

¿Qué ocurre cuando la señal de rayos X no es periódica, sino cuasiperiódica? Su espectro de potencias no muestra máximos estrechos, sino un



4. GRUMOS DE PLASMA del disco de acreción que rodea una estrella de neutrones vieja (la que posee un campo magnético débil). Son, de acuerdo con el modelo magnetosférico de frecuencia de pulsación, la fuente de las QPO "rápidas". Cada vez que un grumo pasa frente a una "entrada" de la magnetosfera (la región donde el plasma se mueve a lo largo de las líneas de campo magnético enraizadas en la estrella), parte del mismo empieza a caer sobre la superficie de la estrella, emitiendo un destello de rayos X cuando impacta en ella. De esta forma, se genera un tren gradualmente evanescente de pulsos rayos X cuya frecuencia es igual a la diferencia entre la frecuencia orbital de los grumos de plasma y la frecuencia de rotación de la magnetosfera —su frecuencia de pulsación. La señal de rayos X que se obtiene presenta un ancho pico QPO en su espectro de potencias. Muchos grumos del plasma podrían contribuir simultáneamente a la señal total de rayos X que se emite en las inmediaciones de la estrella de neutrones; sin embargo, esta señal presentaría un espectro de potencias similar.

pico ancho, ya que su potencia se reparte entre muchos empaquetamientos de frecuencias. En este caso, estrechar los empaquetamientos resulta contraproducente: cuantos más empaquetamientos de frecuencias haya en el espectro de frecuencias, más repartida estará entre ellos la señal cuasiperiódica y, por tanto, más fácilmente se perderá entre el ruido de fondo. Una de las razones por las que la astronomía de rayos X ha necesitado más de 25 años para identificar las QPO se halla en las propias señales que se esperaban encontrar: se las suponía periódicas y se buscaba picos bien definidos cuando se utilizaba empaquetamientos estrechos para los espectros de potencias.

Por fortuna para mis colegas y para mí, habíamos dispuesto casualmente los cálculos de manera que los empaquetamientos del espectro de potencias fueran bastante anchos; ello explica que la variabilidad cuasiperiódica de GX5-1 se identificara casi desde la primera observación. Habiendo encontrado indicios de un ancho pico en el espectro de potencias, utilizamos un espectro de potencias "dinámico", que nos permitía seguir la evolución del pico en función del tiempo. Este espectro demostró que el pico de la señal de rayos X de GX5-1 presentaba una deriva sobre un extenso rango de frecuencias, entre 20 y 40 hertz (ciclos por segundo).

A pesar de que la alta frecuencia media de las QPO implica que su origen debe estar cerca de la superficie de una estrella colapsada, notamos inmediatamente que no estábamos viendo una consecuencia directa de la rotación de la estrella de neutrones: el ritmo de rotación de la estrella debería haber cambiado en un factor dos en unas pocas horas, cosa imposible. Ahora bien, si las oscilaciones no se generaban directamente por la rotación de la estrella de neutrones, ¿qué las podía causar?

Un posterior examen del espectro dinámico de potencias de GX5-1 nos dio una pista: parecía que, siempre que las oscilaciones aumentaban de frecuencia, los rayos X eran más intensos. Recíprocamente, cuando las oscilaciones disminuían de frecuencia, la intensidad de los rayos X caía también. Este comportamiento sugería que la magnetosfera podía ser responsable de las QPO.

El tamaño de la magnetosfera de una estrella de neutrones queda fijado por la acción de dos fuerzas opuestas. Mientras que el plasma que cae hacia la estrella, describiendo espirales desde el disco de acreción, tiende a comprimir la magnetosfera, las fuerzas magnéticas tienden a expandirla. En consecuencia, un aumento del ritmo al cual la materia cae hacia la estrella de neutrones ejerce dos efectos. Primero, se libera más energía gravitatoria, de forma que la emisión de rayos X por la estrella deviene más intensa. Segundo, las fuerzas sobre la materia se hacen más intensas que las magnéticas y, por tanto, la magnetosfera se encoge; ello conlleva que el plasma que orbita libremente, justo en esa zona límite, pueda moverse en órbitas más pequeñas, es decir, más rápidas. Se concluye, pues, que, si las oscilaciones se deben al movimiento orbital del plasma, justo en el límite de la magnetosfera de la estrella de neutrones, cabe esperar que su frecuencia aumente a medida que la intensidad de los rayos X crezca. Y eso es lo que se ha observado.

Sin embargo, un análisis más detallado demostró la inadmisibilidad de esta hipótesis: la relación exacta entre la intensidad de rayos X y la frecuencia de las QPO no se reproducía en los cálculos. Pero entonces a M. Ali Alpar, de la Universidad de Illinois en Urbana Champaign, y A. Jacob Shaham, de la Universidad de Columbia, se les ocurrió una afortunada idea: la frecuencia de las oscilaciones observada no tenía por qué ser igual a la frecuencia orbital de la materia situada en el límite externo de la magnetosfera; podía ser igual a la diferencia entre esa frecuencia y la frecuencia de rotación (desconocida) de la estrella de neutrones.

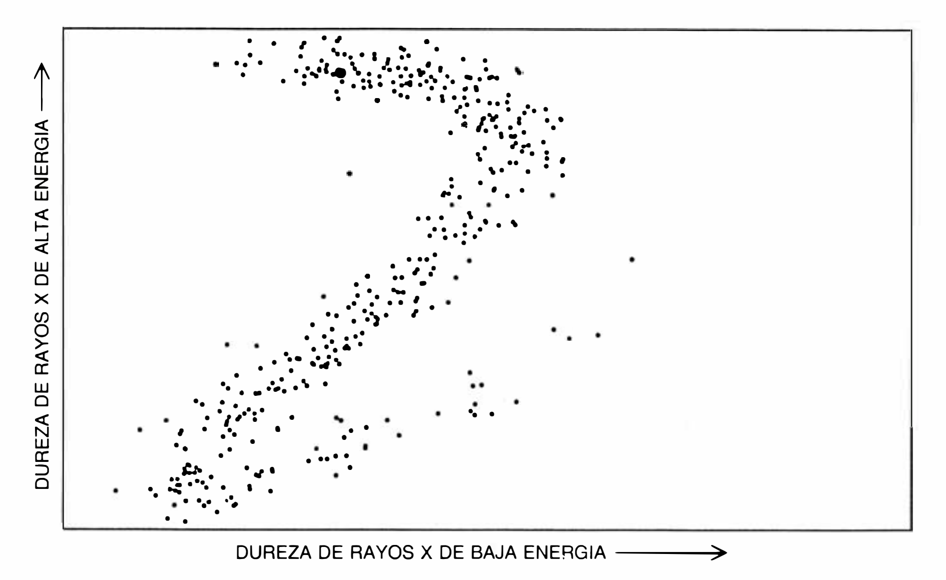
Esta idea se entenderá mejor con un ejemplo. Pensemos en las agujas de un reloj. La frecuencia de la manecilla de los minutos es de un ciclo por hora; la pequeña, la de las horas, de un doceavo de ciclo por hora. La frecuencia con que el minutero sobrepasa la aguja pequeña —su frecuencia "de pulsación"— viene dada por la diferencia entre ambas frecuencias: 11/12 por hora, o sea, aproximadamente una vez cada hora y cinco minutos. En el modelo de Alpar-Shaham, la frecuencia de las QPO viene dada por la frecuencia de pulsación entre la materia que se mueve en el disco de acreción y la magnetosfera que gira con la misma velocidad de rotación que la estrella de neutrones (corrota con ella). En esencia, la frecuencia de pulsación es la frecuencia a la que una partícula de plasma encuentra una línea del campo magnético de la magnetosfera en rotación. Este modelo explica la relación observada entre la frecuencia de las QPO y la intensidad de los rayos X.

De este modelo podría inferirse que el período de rotación de la estrella de neutrones que se halla en el corazón de GX5-1 tendría que ser de unos 10 milisegundos y que la intensidad de su campo magnético alcanzaría unos mil millones de gauss, 1000 veces más débil que el de una estrella de neutrones joven. La magnetosfera debería hallarse a unos 60 kilómetros de altura de la superficie de la estrella. Todo esto se ajustaba a las ideas aceptadas sobre las estrellas de neutrones viejas; concordaba también con la sospecha según la cual los radiopúlsares con períodos de milisegundos evolucionan a partir de las binarias de rayos X de escasa masa [véase "Los púlsares más antiguos del Universo", por Jacob Shaham; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1987].

El modelo Alpar-Shaham supone que la causa de las QPO reside en la interacción entre la materia de acreción y la magnetosfera. Pero, ¿qué tipo de interacción? Frederick K. Lamb y Noriaki Shibazaki, de Urbana-Champaign, junto con Alpar y Shaham han venido trabajando en una posible respuesta. Supóngase que el plasma que orbita justo en el límite de la magnetosfera no es homogéneo, sino de una textura grumosa. Supóngase, además, que el plasma penetra por unos puntos de la magnetosfera con mayor facilidad que en otros. Imaginemos que dicha penetración resultara más sencilla cerca de los polos magnéticos de la estrella de neutrones. Cada vez que un grumo de plasma pasa cerca de un polo magnético, parte de aquél se introduce en la magnetosfera y cae hacia la estrella de neutrones, provocando una pequeña erupción de rayos X. La historia se repite siempre que el grumo pasa por el mismo polo —lo que sucede una vez por período de pulsación—, hasta que el grumo de plasma se agota.

La señal de rayos X resultante es una serie rápida de pequeños destellos evanescentes, cada uno de ellos separado del siguiente por un período de pulsación. Este tren de pulsos constituye una señal cuasiperiódica cuyo espectro de potencias contiene dos picos: uno se debe a las erupciones individuales en el tren y el otro (a frecuencia cero) corresponde al tren de impulsos tomados en su conjunto. Un pico de frecuencia cero es un rasgo peculiar del espectro de potencias de GX5-1. Muchos grumos de plasma pueden contribuir simultáneamente a la señal total, dando lugar a muchos trenes de pulsos sobrepuestos; sin embargo, la señal del espectro de potencias mantendrá la misma forma básica.

Desde su introducción, este modelo ofrecía una obvia dificultad potencial. Si en el centro de GX5-1 había una es-



5. ESTADOS ESPECTRALES DE UNA FUENTE DE RAYOS X. Para apreciarlos, se representa la dureza de su radiación (el cociente entre el número de fotones de alta energía y el de los de baja energía) en función de la intensidad total de la radiación o, tal como se muestra aquí para Cygnus X-2, dibujando la dureza en una banda espectral de rayos X con respecto a la dureza en otra banda. El diagrama de Hasinger revela tres ramas, conectadas en forma de Z, que corresponden a los tres estados espectrales diferentes que adopta Cygnus X-2. Las QPO rápidas se observan cuando la radiación X se da en la rama horizontal superior; por su parte, las QPO "lentas", se distinguen cuando la radiación X cae en la rama diagonal media.

trella de neutrones que giraba sobre su eje, a una velocidad de cientos de revoluciones por segundo, y dotada de un campo magnético de intensidad suficiente para formar una magnetosfera, ¿por qué no se observa entonces un púlsar de rayos X muy rápido? A fin de cuentas, una magnetosfera sería capaz de canalizar el plasma que rodea la estrella hacia los polos magnéticos, donde deberían formarse manchas calientes. Para muchos astrofísicos, esta cuestión constituye suficiente motivo para mostrarse escépticos ante cualquier modelo magnetosférico para las QPO.

No obstante, la ausencia de un púlsar de rayos X detectable no atenta contra el modelo, a pesar de las apariencias. La estrella de neutrones en GX5-1 posee un campo magnético que es mucho más débil que el existente en una estrella de neutrones joven. Por tanto, sus manchas calientes pueden ser mucho mayores que las de una estrella de neutrones joven de un sistema binario —podrían cubrir la mayor parte de la superficie de la estrella—; así, el "efecto faro" de las manchas calientes queda muy reducido. Además, la gran cantidad de plasma que rodea la magnetosfera podría difuminar cualquier pulsación de rayos X por dispersión múltiple de los fotones de rayos X.

En este momento, el gran reto con el que se enfrenta el modelo magnetosférico de frecuencia de pulsación procede de las observaciones realizadas por *EXOSAT* de otras fuentes QPO. Estas nuevas fuentes muestran oscilaciones de intensidad en los rayos X, con una desconcertante variedad de propiedades, que suelen diferir de las mostradas por GX5-1.

Las nuevas QPO presentan a menudo frecuencias muy bajas, de cinco a siete hertz. Más aún. En vez de aumentar al mismo tiempo que la radiación X de la fuente, la frecuencia permanece constante, disminuye ligeramente o varía de forma errática. Sus espectros de potencia no presentan siempre un pico cerca de la frecuencia cero, tal como sucede en el espectro de potencia de GX5-1 y tal como predice el modelo magnetosférico de frecuencia de pulsación.

Muchos astrofísicos atribuyen esas propiedades a un segundo tipo de QPO, las "QPO lentas". Fundamentan su hipótesis en la comprobación de la asociación, de cada tipo de QPO, con un estado espectral característico (distribución de la energía de los fotones rayos X). Los estados espectrales se distinguen claramente representando la "dureza" de la fuente de rayos X (el cociente entre el número de fotones rayos X de alta energía y el de los de baja energía) en función de la intensidad de dichos rayos X.

Desde mucho antes del descubrimiento de las QPO, se sabía que cuando los estados espectrales medidos de GX5-1 y los de una fuente muy similar, Cygnus X-2, se representaban en un diagrama dureza-intensidad, se concentraban en dos ramas distintas, una horizontal y otra diagonal, que confluían en la esquina superior derecha del diagrama. Posteriores observaciones de las QPO corroboraron que las QPO "rápidas" se distinguían sólo cuando la fuente de rayos X se hallaba en un estado espectral de la rama horizontal superior, mientras que las QPO "lentas" se veían únicamente si la fuente se hallaba en un estado de la rama diagonal.

Por desgracia, había una muy (literalmente) brillante excepción a la regla: Scorpius X-1, la fuente de rayos X más intensa del cielo nocturno. Esta fuente que, en mayo de 1985, John Middleditch y William C. Priedhorsky, del Laboratorio Nacional de los Alamos, habían incluido entre las fuentes QPO, mostraba un comportamiento que se parecía superficialmente al de otras fuentes QPO: en un estado espectral exhibía QPO lentas mientras que en otros eran rápidas, con frecuencias (de 10 a 20 hertz) que guardaban relación con la intensidad de la emisión X. Ahora bien, estudiada con más detalle, Scorpius X-1 difería sin ambages de otras fuentes QPO. En particular, sus dos ramas de estados espectrales parecían únicas: confluían en la esquina inferior izquierda, en vez de hacerlo en la superior derecha del diagrama dureza-intensidad.

El hecho clave que permitió resolver esta confusa situación lo aportó Gunther Hasinger, del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre. Hasinger propuso que las ramas del estado espectral del diagrama dureza-intensidad para Scorpius X-1, GX5-1 y Cygnus X-2 eran partes de una misma estructura, que constaba de tres ramas dispuestas en forma de "Z". Este tipo de estructura posibilita la unión de las ramas en las dos esquinas, la superior derecha y la inferior izquierda. Posteriores observaciones de Cygnus X-2, así como de otras fuentes de rayos X, confirmaron brillantemente las predicciones de Hasinger [*véase la figura 5*].

Muy probablemente, las QPO de 10 a 20 hertz de frecuencia, que se observan cuando Scorpius X-1 se encuentra en un estado espectral de la rama baja del diagrama dureza-intensidad, no son más que otra forma de QPO lenta. Para afirmar tal hipótesis nos apoyamos en la observación de QPO lentas, que se transforman gradualmente en QPO de la "tercera rama" a medida que el estado espectral de Scorpius X-1 va girando desde la rama diagonal hacia la tercera rama inferior. Otro sostén de esa afirmación es que las QPO de la tercera rama, igual que las QPO lentas, no tiene un pico a frecuencia cero en el espectro de potencias.

La mayoría de las fuentes QPO conocidas hasta el momento encajan dentro de la estructura de estados espec-

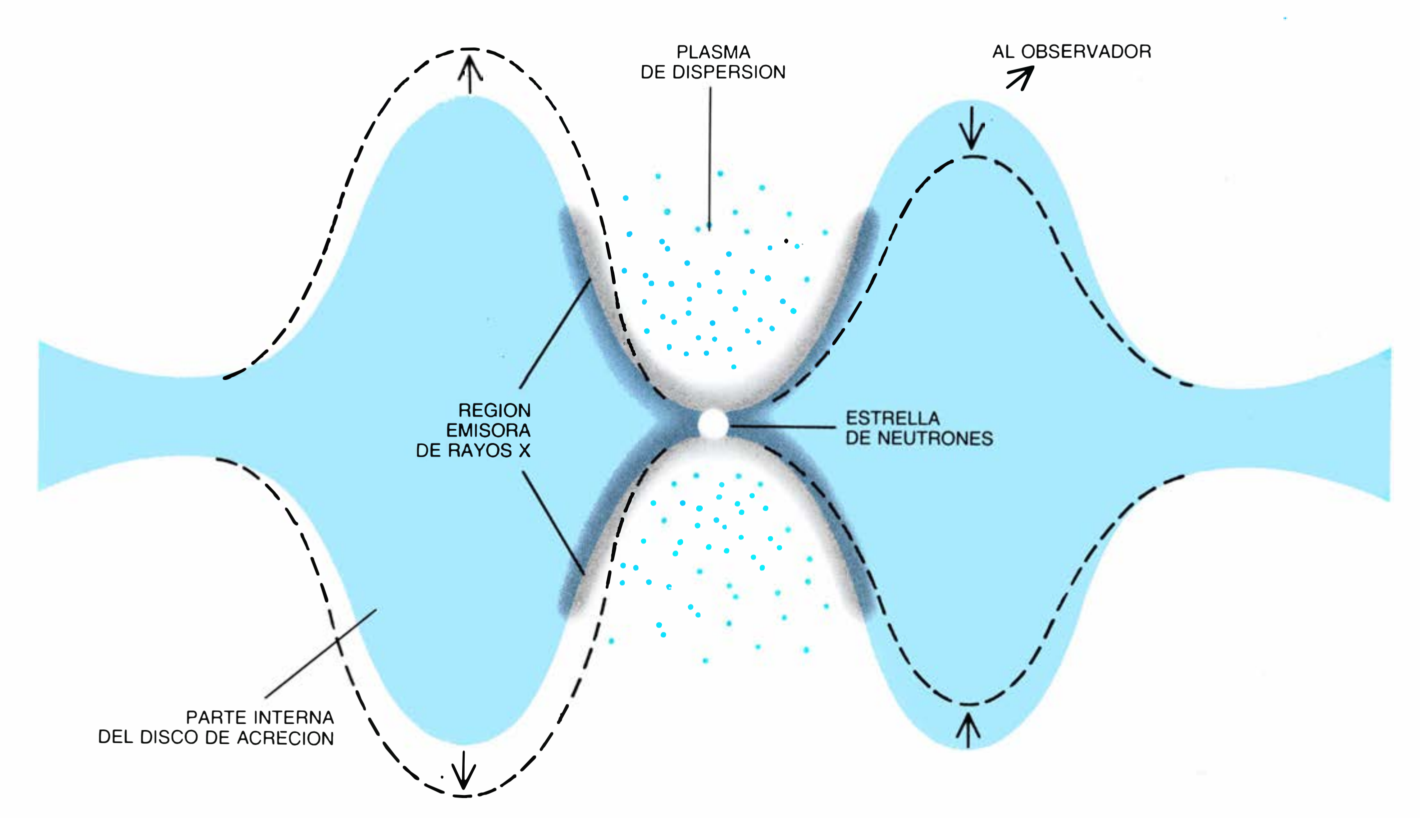
trales en Z, aunque también aquí haya algunas excepciones. Una excepción particularmente anómala es el Emisor Rápido ("Rapid Burster"). Utilizando el satélite japonés Hakucho, Y. Tawara, de la Universidad de Nagoya, y sus colegas encontraron, en 1982, oscilaciones lentas de unos dos hertz de frecuencia en esta fuente de rayos X. Además de no adecuarse a la estructura en Z, las oscilaciones del Emisor Rápido difieren de las QPO lentas en otros aspectos.

Aunque sea posible acomodar la mayoría de propiedades discrepantes de las QPO lentas en el modelo magnetosférico de frecuencia de pulsación, muchos astrofísicos piensan que las QPO lentas requieren una explicación diferente. Se han propuesto innumerables modelos alternativos para explicarlas, algunos de ellos sin ninguna relación con los efectos magnetosféricos. Un modelo de ésos, de gran sencillez conceptual, fue analizado por Luigi Stella y Nick E. White, del equipo del observatorio *EXOSAT*, y por el propio autor, con el propósito de hallar explicación a las QPO lentas de Scorpius X-1. El modelo parte de dos propiedades fundamentales de todas las fuentes QPO conocidas: el disco de acreción roza la superficie del objeto compacto y la radiación X es extremadamente intensa. La verdad es que desconocemos si esta segunda propiedad constituye una característica real de todas las fuentes QPO o si se trata de una mera ilusión creada por la facilidad de detectar las QPO en fuentes intensas de rayos X. La conjunción de esas dos propiedades (si son ciertas) tienen importantes consecuencias para las fuentes QPO.

La gran cantidad de fotones de rayos X emitida en las inmediaciones de una estrella compacta ejerce una considerable presión contra el plasma circundante. A medida que la fuente de rayos X brilla con más intensidad, aumenta la presión de radiación. En algún momento, puede llegar a ser tan intensa que supere la fuerza de atracción gravitatoria a la que está sometido el plasma; los fotones de rayos X pueden literalmente hacer estallar el plasma. La intensidad de rayos X a la que esto ocurre se denomina límite de Eddington, en honor al astrónomo británico Arthur S. Eddington. Para una estrella de neutrones normal, este límite se cifra en unas 100.000 veces la luminosidad solar. Casi todas las fuentes QPO tienen luminosidades de rayos X cercanas a su límite de Eddington; en teoría no pueden brillar más porque la presión de radiacion evitaría la acreción.

Pero la mera ubicación de las luminosidades por debajo mismo del límite de Eddington acarrea ya importantes consecuencias. En particular, se cree que tales luminosidades pueden generar presión de radiación suficiente para que las regiones internas del disco de acreción sean barridas hacia el exterior y así el disco se parecerá a una rosquilla [*véase la figura 6*]. Según el ángulo de visión propio, esta rosquilla de plasma puede oscurecer parcial o totalmente los rayos X emitidos por el agujero central, donde debe encontrarse la estrella compacta. Si esta rosquilla de plasma se expandiese y contrayese en una dirección paralela al eje de rotación, podría producir entonces QPO, por la sencilla razón de que expondría y ocultaría, alternativamente, la fuente de rayos X. Aunque seguimos sin conocer bien las propiedades de tales discos de acreción hinchados, puede demostrarse, a partir de principios elementales de física, que los movimientos del plasma podrían tener las frecuencias necesarias para explicar las QPO lentas.

¿Cómo podrían los astrónomos sondear las regiones internas de un brillante sistema binario de poca masa e intenso emisor de rayos X, para someter a prueba sus modelos magnetosféricos de frecuencia de pulso, de la rosquilla de plasma y otros? Un primer modo sería el de medir el retraso temporal entre la llegada de rayos X de alta energía y los de baja energía de las fuentes QPO. Hasinger ha registrado tales diferencias temporales midiendo la demora de las correspondientes oscilaciones de la radiación X de alta y baja energía proveniente de Cignus X-2. Retrasos temporales similares se han registrado también en las QPO de GX5-



6. EXPANSIONES Y CONTRACCIONES que se pueden dar en la región interna de un disco de acreción en forma de rosquilla. En el modelo de oscurecimiento, dan cuenta de las QPO lentas. Los movimientos intermitentes del plasma permiten estudiar las regiones de rayos X cercanas a la estrella de neutrones.

1. La diferencia en el tiempo de llegada es pequeña —contados milisegundos—, aunque importante.

Es muy posible que estas diferencias temporales se deban a un proceso de efecto Compton inverso, que se produce cuando los fotones se dispersan en un plasma extremadamente caliente. Cada vez que un fotón interactúa con uno de los muchos electrones rápidos que se hallan en el plasma, parte de la energía del electrón se transfiere al fotón, desplazando la energía de éste en el espectro electromagnético. En consecuencia, los fotones que se dispersan varias veces terminan convertidos en rayos X de alta energía, mientras que los que sólo sufren algunas colisiones permanecen a baja energía. Además, los fotones que acaban en rayos X de alta energía han sufrido muchos más procesos de dispersión que los que permanecen a baja energía; por tanto, tardan más en emerger del plasma. (Probablemente sea esta dispersión en el tiempo de llegada de los fotones, a causa del efecto Compton inverso, la responsable de que no se hayan detectado todavía púlsares de rayos X en la escala del milisegundo.)

La cuantía de esta demora depende de varios factores importantes: temperatura del plasma dispersor, densidad y tamaño. Podemos, pues, recabar información directa sobre las condiciones reinantes en las regiones internas de las binarias de rayos X de poca masa registrando y analizando los retrasos existentes en la llegada de rayos X, de alta y baja energía, asociados a determinada oscilación.

He aquí un ejemplo de cómo las QPO son ventanas abiertas a una de las regiones más oscuras de la astrofísica de altas energías. Apenas si acabamos de empezar a explorar las imágenes que nos ofrecen.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INTENSITY-DEPENDENT QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS IN THE X-RAY FLUX OF GX5-1. M. Van der Klis, F. Jansen, J. van Paradijs, W. H. G. Lewin, E. P. J. van den Heuvel, J. E. Trümper y M. Sztajno en *Nature*, vol. 316, n.º 6025, págs. 225-230; 18 de julio de 1985.

THE PHYSICS OF ACCRETION ONTO COMPACT OBJECTS. En *Lecture Notes in Physics*, vol. 266; 1986.

THE PHYSICS OF COMPACT OBJECT: THEORY VS. OBSERVATIONS. En *Advances in Space Research*, vol. 8, n.º 2-3; 1988.

A REVIEW OF QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS IN LOW-MASS X-RAY BINARIES. W. H. G. Lewin, J. van Paradijs y M. van der Klis en *Space Science Reviews*, vol. 46, págs. 273-377; 1988.

¿Por qué es metastásica la célula tumoral?

Las células que diseminan el cáncer por el cuerpo poseen rasgos moleculares distintivos. Los oncólogos han amasado suficiente información acerca de esos rasgos y podrían convertir células malignas en benignas

Michael Feldman y Lea Eisenbach

El principal problema clínico que presenta el cáncer es el de la metástasis; así se llama la emigración hacia la sangre o el sistema linfático de células tumorales que pueden originar tumores en cualquier lugar del cuerpo. Si las células cancerosas no formaran metástasis, bastaría la intervención quirúrgica del tumor para curar el cáncer. Ocurre, sin embargo, que, cuando se detecta el tumor "primario", las células han huido ya del mismo y se han asentado en otros órganos depositando allí semillas de tumores "secundarios". Ha empezado la lid contra la malignidad, que raramente gana el paciente.

El cáncer dejaría de ser el enemigo temible, si lográsemos controlar las metástasis. Cierto es que se avanza con buen paso hacia el conocimiento de las metástasis. Quince años atrás, cuando empezábamos nuestras investigaciones en el Instituto Weizmann de Ciencia en Israel, se sabía ya que unos tumores eran más metastásicos que otros. Conocíase también que el tumor se caracterizaba por su capacidad de formar metástasis: unas células poseían mayor facilidad para ello que otras. Tales observaciones constituían la base de las investigaciones en las que nosotros demostramos la presencia de ciertas características que distinguían las células capaces de producir metástasis de las incapaces de hacerlo.

MICHAEL FELDMAN y LEA EISENBACH trabajan juntos en el Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot. Feldman tiene a su cargo la cátedra Klutznik de biología del desarrollo y dirige el departamento de biología celular. Es doctor por la Universidad Hebrea de Jerusalén y ha disfrutado años sabáticos en la Universidad de California en Berkeley, en el Hospital Clínico de la Universidad de Stanford y en el Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos. Desde 1977 pertenece a la Academia de Ciencias y Humanidades de Israel. Su investigación sobre la inmunología del cáncer le hizo ganar el premio Griffuel en 1984. Eisenbach entró en el laboratorio de Feldman en 1980. Se doctoró en el Weizmann y durante un año trabajó en la Universidad de Wisconsin en Madison, antes de regresar a Israel. Hoy le liga un contrato con el departamento de biología celular.

Aquellos hallazgos nuestros revelaron algunas pistas para descubrir el mecanismo en virtud del cual las células forman metástasis y la posibilidad de impedírselo. Acabamos de aplicar con éxito los principios extraídos de nuestra investigación a la inmunización contra la dispersión metastásica del cáncer de pulmón en ratones. Estos experimentos podrían servir de investigación básica para el desarrollo de una "vacuna del cáncer".

Queda mucho camino por andar. La caracterización de los atributos metastásicos dista mucho de ser completa y no está claro todavía hasta qué punto nuestros hallazgos, basados en experimentos realizados con ratones, pueden generalizarse a los seres humanos. Estamos también investigando la conexión entre metástasis y oncogenes (genes cuya activación se halla implicada en la formación de un tumor); se ignora si los genes que estimulan el crecimiento descontrolado son, asimismo, responsables de la dispersión del cáncer. Esperamos que nuestras investigaciones ayuden a solucionar otras cuestiones afines; verbigracia: por qué unos tumores son más metastásicos que otros y por qué los cerebrales no forman metástasis, siendo así que los tumores establecidos en otros órganos sí se extienden hasta el cerebro. Obvio es decir que nuestro trabajo constituye sólo una pequeña parte del esfuerzo hoy empeñado en determinar la base molecular de la tumorigenicidad.

La primera indicación de que las células de un tumor podrían distinguirse entre sí por su capacidad de producir metástasis se la debemos a los estudios realizados en los años 1970 por J. Joshua Fidler y Margaret L. Kripke, que trabajaban por entonces en el Instituto Nacional del Cáncer. Fidler y Kripke utilizaban ratones para investigar el melanoma, un cáncer de la piel que tiende a formar metástasis en los pulmones. Al objeto de comprobar la competencia metastásica de cada célula, extraían células de un tumor primario, las separaban unas de otras y creaban un "clon" de cada una de ellas. (Todas las células de una población clonada son idénticas porque todas descienden de una misma.)

Fidler y Kripke transplantaron células de los clones a ratones sanos y buscaron luego la aparición de metástasis en el pulmón. Descubrieron que ciertos clones producían muchas más metástasis que otros y que algunos ni siquiera generaban el tumor pulmonar [*véase la figura 4*]. Daba la impresión de que la producción de metástasis fuera un trabajo especializado.

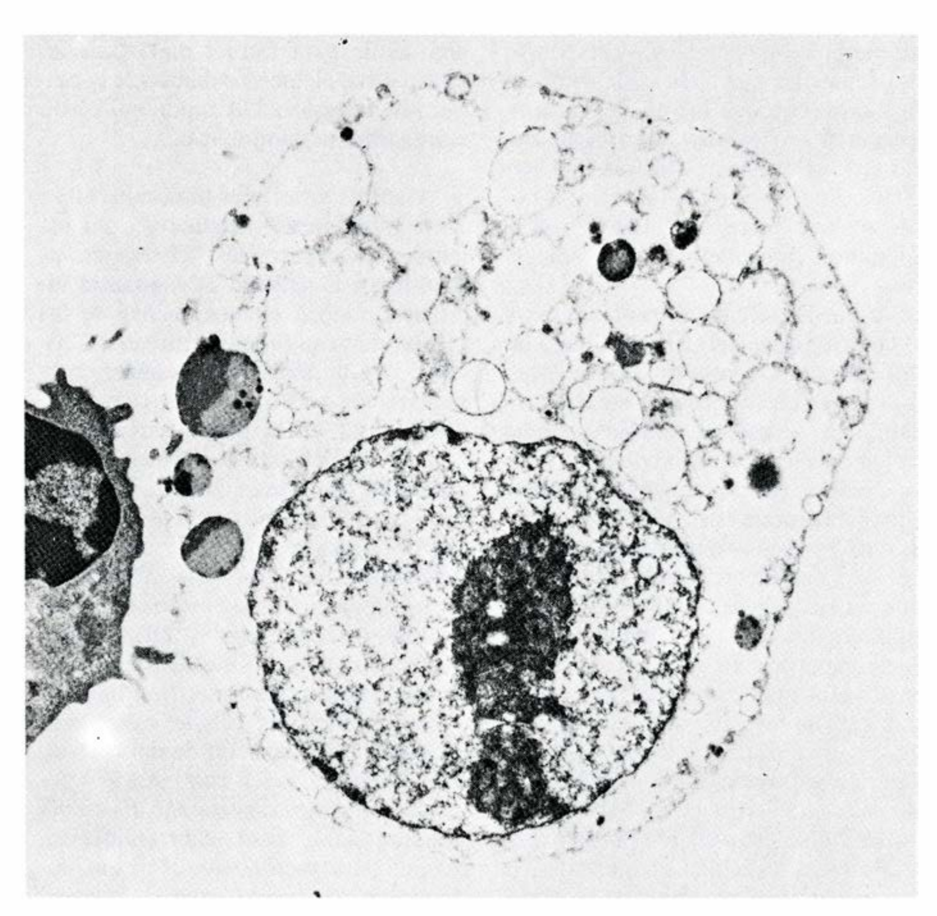
Visto en retrospectiva, no cabía sorprenderse de que todas las células no fueran capaces de desencadenar la metástasis. La célula metastásica debe desprenderse de su tumor progenitor, invadir la matriz que media entre células y atravesar la membrana de un vaso sanguíneo. Ha de sobrevivir a su paso por el torrente circulatorio, en donde patrullan células hostiles del sistema inmunitario, y salir del torrente sanguíneo en el lugar favorable. Después de aposentarse en el tejido circundante, debe inducir el crecimiento de nuevos vasos sanguíneos para nutrir al tumor que se está formando [*véase la figura 2*].

Cada paso se halla probablemente controlado por un sistema molecular

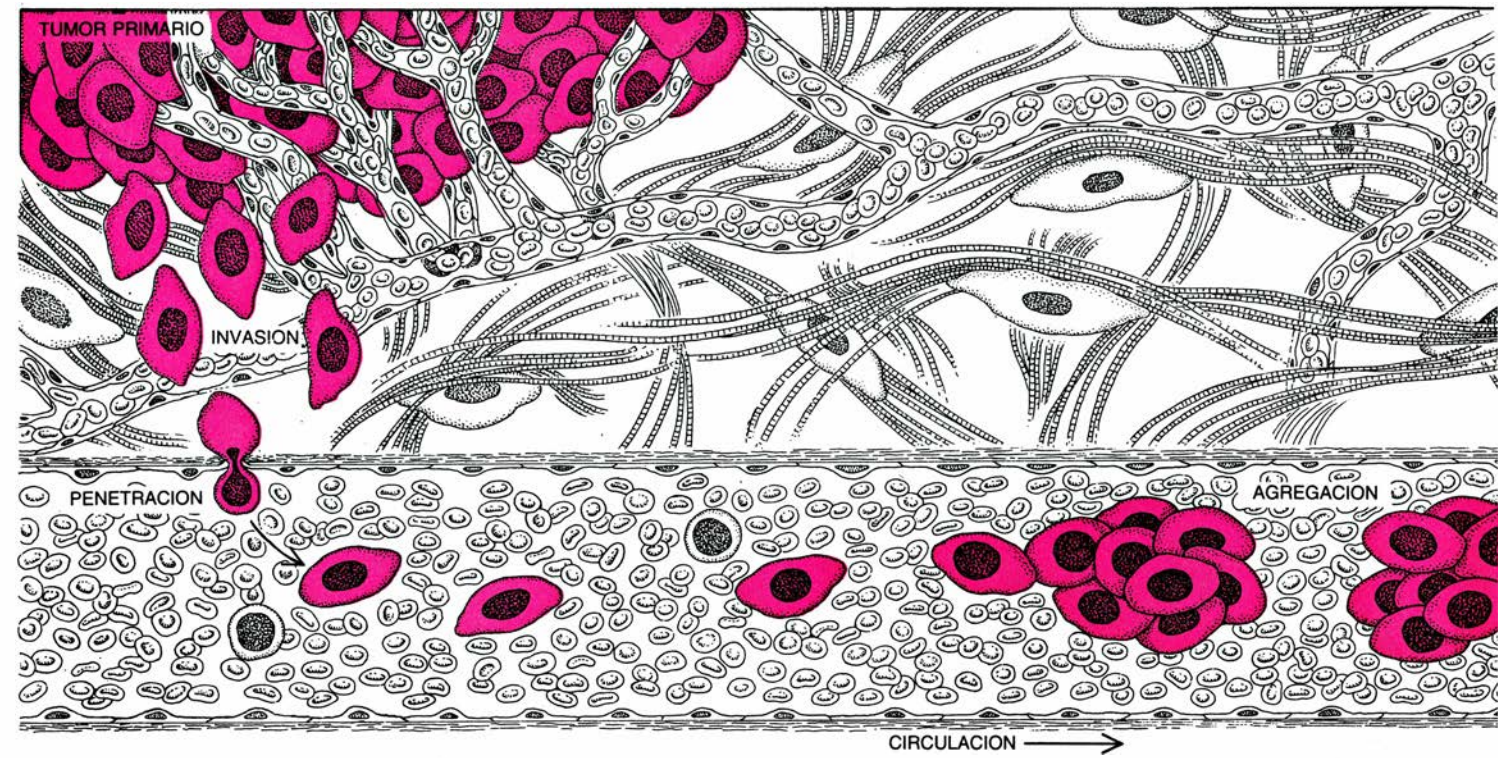
diferente; el fallo de cualquiera de estos sistemas haría, probablemente, que la célula tumoral no provocara metástasis. Por tanto, las diferencias moleculares entre células metastásicas y las que no forman metástasis lo mismo pueden ser muchas que pocas. Así se planteaba la situación cuando iniciamos la búsqueda de los rasgos discriminantes; nos centramos en las enzimas requeridas para las etapas iniciales de la diseminación de la célula tumoral.

Una de estas enzimas se denomina colagenasa tipo IV, que se va comiendo las paredes de los vasos sanguíneos al degradar uno de sus principales componentes estructurales: el colágeno IV. Otros estudios precedentes habían demostrado que los tumores malignos y benignos diferían en su capacidad de fabricar y secretar colagenasa. A nosotros nos interesaba saber si las células de un mismo tumor producían también diferentes cantidades de la enzima.

En estos experimentos y en la mayoría de los realizados posteriormente, utilizábamos dos tumores comunes del ratón: el carcinoma 3LL (de "Lewis lung", pulmón de Lewis) y el sarcoma T10. Las carcinomas y los sarcomas son dos tipos de tumores sólidos; llámase carcinoma al tumor del tejido epitelial (así, la mama, el colon o el pulmón) y, sarcoma, al tumor del tejido conectivo. Clonamos células de los dos tumores y sometimos luego a prueba clones seleccionados al azar para apreciar su com-



1. LA CELULA ASESINA ATACA Y DESTRUYE una célula cancerosa. La célula asesina (*arriba, a la izquierda*) reconoce la célula cancerosa y se ancla en ella por medio de moléculas únicas que existen sobre la superficie de la célula cancerosa (*arriba*). La célula asesina segrega, luego, una sustancia que hace que la célula cancerosa estalle (*abajo*). En el cuerpo, muchas de las células que se desprenden de los tumores acaban así, pero algunas poseen en su superficie determinadas moléculas que les permiten evadir el sistema inmunitario. Estas células gozan de mayor probabilidad de sobrevivir a lo largo del viaje metastásico.



2. LLAMASE METASTASIS al establecimiento de un nuevo tumor "secundario" (*derecha*) por una célula cancerosa que se desplaza a través del torrente circulatorio, procedente de un tumor "primario" (*izquierda*). La célula metastásica debe, en primer lugar, invadir la matriz que rodea al tumor primario y atravesar después la pared del vaso sanguíneo, para entrar en la circulación. Una vez ya en el torrente sanguíneo, la célula busca una localización adecuada para la formación de un nuevo tumor; en su camino puede agregarse a otras células tumorales metastásicas. Cuando la célula llega a su punto de destino, sale

petencia metastásica. Al mismo tiempo, medimos la síntesis de colagenasa y su secreción por cada clon. Nos encontramos con que los niveles de producción de colagenasa eran equiparables en los clones metastásicos y no metastásicos. Ambas clases de células podían realizar pasos de la diseminación del tumor controlados por la colagenasa.

En clones de células metastásicas y no metastásicas, comparamos luego las cantidades de otra enzima que se hallaba implicada en la penetración del vaso sanguíneo. Algunos estudios habían demostrado que el activador del plasminógeno desempeñaba un importante papel en la metástasis. Vimos, en efecto, que los clones metastásicos producían más cantidad de esta enzima que los no metastásicos. Tal disparidad, sin embargo, no parecía influir en el potencial metastásico, pues ambos clones invadían la matriz intercelular. Posteriormente se fue aclarando por qué: las células no metastásicas inducían la acumulación de macrófagos, células sanguíneas que segregaban abundante cantidad del activador del plasminógeno. Es decir, las células no metastásicas lograban atravesar la pared de los vasos sanguíneos "tomando prestadas" las enzimas de los macrófagos.

Nuestro trabajo con enzimas celulares nos llevó a sospechar que las interacciones que dictaban la capacidad de una célula para formar metástasis incluían otros elementos dentro de la cascada metastásica. Un candidato obvio era el sistema inmunitario.

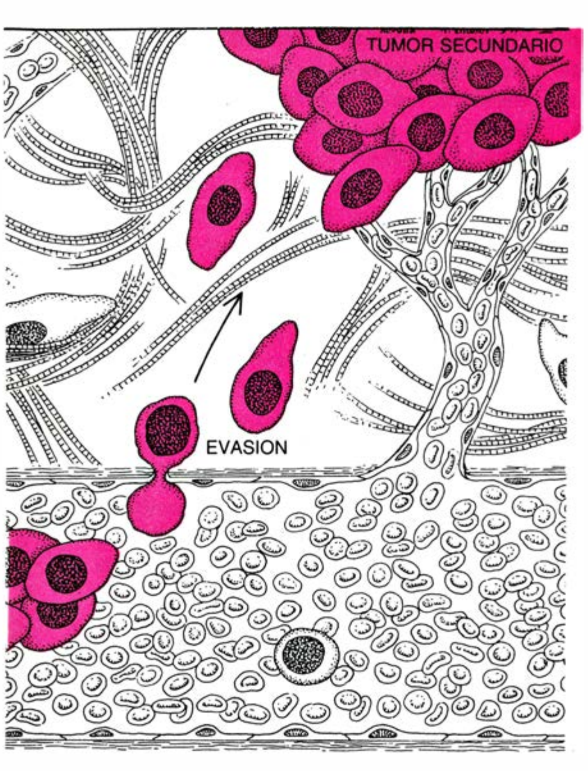
Mientras las células tumorales están proliferando localmente, les salen a su encuentro las del sistema inmunitario; el servicio de vigilancia inmunitario sigue el movimiento de las células durante todo el proceso metastásico: en la matriz intercelular, en la penetración en los vasos sanguíneos y, sobre todo, en la propia circulación. Las células del sistema inmunitario intervienen de forma solidaria y coordinada en el ataque contra cualquier cuerpo foráneo que lleve antígenos, marcadores de superficie distintivos. En la "línea de frente" están las células citotóxicas o "asesinas" ("killer"), linfocitos *T* cuya tarea consiste en eliminar las células portadoras de antígenos.

Aun cuando las células cancerosas proceden del propio tejido del cuerpo, convertidas en tales comienzan a generar "antígenos tumorales". La célula tumoral sufre, pues, una transición: deja de ser la entidad que el sistema inmunitario reconocía como "propia" para devenir una entidad que el sistema inmunitario considera extraña. En nuestros ensayos tuvimos en cuenta la posibilidad de que las células asesinas vieran, en las células que forman metástasis, un grado de extrañeza distinto del que reconocieran en las que no metastatizan.

Nuestro primer impulso fue comparar la inmunogenicidad de los antígenos tumorales procedentes de clones metastásicos y no metastásicos, pero estos antígenos no se han aislado ni caracterizado todavía. Cabía entonces examinar otro grupo de moléculas de la superficie celular que participan en el reconocimiento inmunitario de rutina y que forman parte del complejo mayor de histocompatibilidad o CMH. Resultó una elección afortunada.

Las moléculas del CMH son glicoproteínas (proteínas que llevan unidas cadenas de azúcar) que actúan como una huella dactilar bioquímica; su composición difiere en cada individuo. Son la señal que el sistema inmunitario considera "propia". Los antígenos foráneos se presentan ante el sistema inmunitario anclados en una molécula del CMC. El sistema inmunitario "ve" la combinación de la molécula del CMC y el antígeno foráneo —"propio" y "ajeno"—, y no sólo el antígeno foráneo.

Las moléculas del CMH se dividen en dos clases; sólo las de la clase I se hallan directamente implicadas en las interacciones entre asesino y célula. Estas moléculas aparecen sobre la su-



del vaso sanguíneo y se aloja en el tejido adyacente. Allí prolifera e induce el crecimiento de una red de vasos sanguíneos que le proporcionen el sustento. Si no se formaran metástasis, bastaría con la cirugía.

perficie de casi todas las células del cuerpo. Se comportan como si constituyeran puntos de anclaje de los linfocitos asesinos; éstos poseen receptores específicos de determinadas combinaciones CMH-antígeno. En los transplantes de órganos actúan de antígenos y provocan el rechazo del tejido transplantado. ¿Podrían las diferencias entre las moléculas del CMH que aparecen sobre las células cancerosas condicionar el reconocimiento asesino-célula y, por ende, la competencia metastásica?

En las postrimerías de la década de los setenta, esa cuestión resultaba insólita. Admitíase entonces que todas las moléculas de la clase I del CMH de un individuo poseían parecida potencia inmunizante, si no idéntica. En el ratón, por ejemplo, son dos los genes que constituyen la clase I del CMH: estos genes y sus productos se denominan H-2K y H-2D. La mayoría de las células expresan H-2K y H-2D en cantidades variables. Salvo en casos esporádicos, no hay razón para sospechar ninguna diferencia entre un producto génico y el otro.

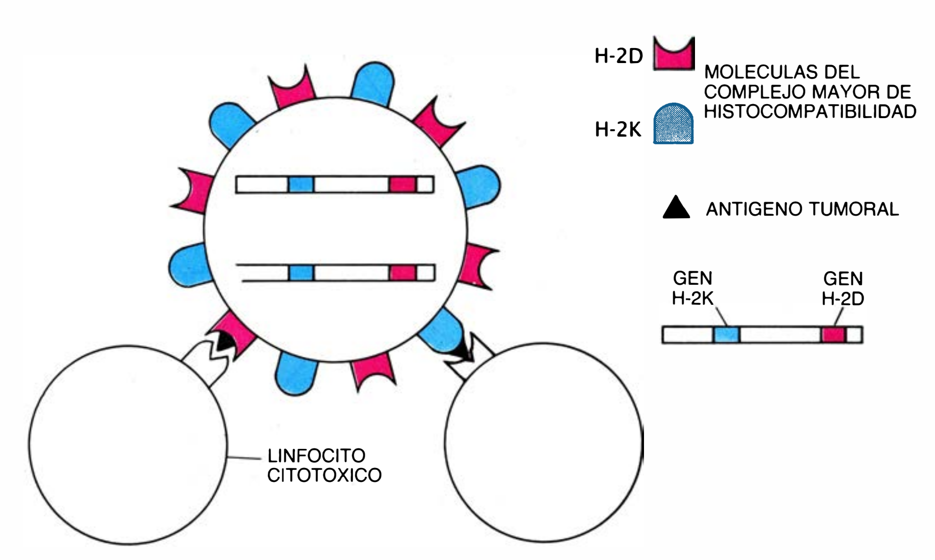
Uno de los casos publicados revestía, sin embargo, especial interés. En él, Henry N. Claman, del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Colorado, sugería que H-2D, aunque no H-2K, podría estar involucrado en el desarrollo de la tolerancia inmunológica; así se llama el fracaso del sistema inmunitario en su reacción ante un determinado antígeno. Tal vez, pensamos nosotros, las moléculas del CMH de un individuo variasen en su inmunogenicidad; quizá H-2D poseía un efecto supresor del reconocimiento inmunitario. En este caso, un antígeno tumoral asociado a H-2K podría conducir o atraer células asesinas, en tanto que el antígeno tumoral asociado a H-2D permanecería invisible a las mismas. A lo mejor, el grado de expresión de los genes H-2K y H-2D en una célula tumoral dependía de la capacidad de la célula para completar la metástasis.

Decidimos someter a prueba la hipótesis con nuestro carcinoma de ratón 3LL. En experimentos previos habíamos desarrollado ya un clon altamente metastásico, el *D*122, y otro clon virtualmente no metastásico, el *A*9. Descubrimos que, en consonancia con nuestra sospecha, las células *D*122 tenían una elevada densidad de H-2D y casi nada de H-2K en su superficie y que las células *A*9 mostraban cantidades aproximadamente iguales de H-2K y de H-2D.

¿Se correspondía esa disparidad en lo concerniente a las moléculas H-2K y H-2D con diferencias específicas en inmunogenicidad? Abordamos la cuestión inyectando células *D*122 y células *A*9 a ratones sanos; observamos su reacción inmunitaria. Para asegurarnos de que la reacción venía promovida por el complejo formado por antígeno tumoral-CMH, y no instada sólo por el reconocimiento de un CMH foráneo, empleamos ratones cuyos CMH fueran idénticos a los expresados por las células tumorales. Estos ratones singénicos, así se les conoce, se consiguen tras una intensa endogamia; sus huellas dactilares del CMH son idénticas.

Las células tumorales que inyectamos habían estado expuestas a una dosis de rayos X, de suerte que no pudieran formar tumores. Dos semanas después de la inyección, extrajimos linfocitos asesinos de los ratones y sometimos a ensayo las interacciones entre células asesinas y células tumorales en cultivo. Resultaba bastante claro que los animales a los que se les habían inyectado células metastásicas *D*122 presentaban respuestas inmunitarias muy débiles; generaban pocas células asesinas para atacar a las tumorales en cultivo. Por el contrario, las células *A*9 provocaban una enérgica respuesta inmunitaria: los animales a los que se les había inyectado generaban células asesinas que destruían las células *A*9 (en menor proporción) y las células *D*122 en cultivo.

En nuestro afán por ver si se mantenía la correlación entre el tipo de CMH y la competencia metastásica examinamos más de 90 clones de 3LL. La correlación persistía. Descubrimos, además, que en la raíz de dicha correlación estaba la proporción de H-2K a H-2D que hubiera sobre la superficie de una célula tumoral, y no la densidad



3. MOLECULAS DE SUPERFICIE del complejo mayor de histocompatibilidad (CMH). Identifican una célula como "propia" e intervienen en la presentación de los antígenos, los marcadores distintivos que el sistema inmunitario reconoce como foráneos. En los ratones, los genes H-2K y H-2D fabrican dos tipos de moléculas del CMH. (Los ratones, como los seres humanos, poseen dos copias de cada tipo de gen.) Linfocitos *T* citotóxicos, o "asesinos", específicos de cada tipo del CMH, se sienten instados a destruir una célula cuando interaccionan con moléculas del complejo mayor de histocompatibilidad que exhiben antígenos foráneos. Las células producen antígenos tumorales en cuanto se convierten en cancerosas; ahora bien, la molécula H-2D del CMH puede entorpecer el reconocimiento de tales antígenos por las células asesinas.

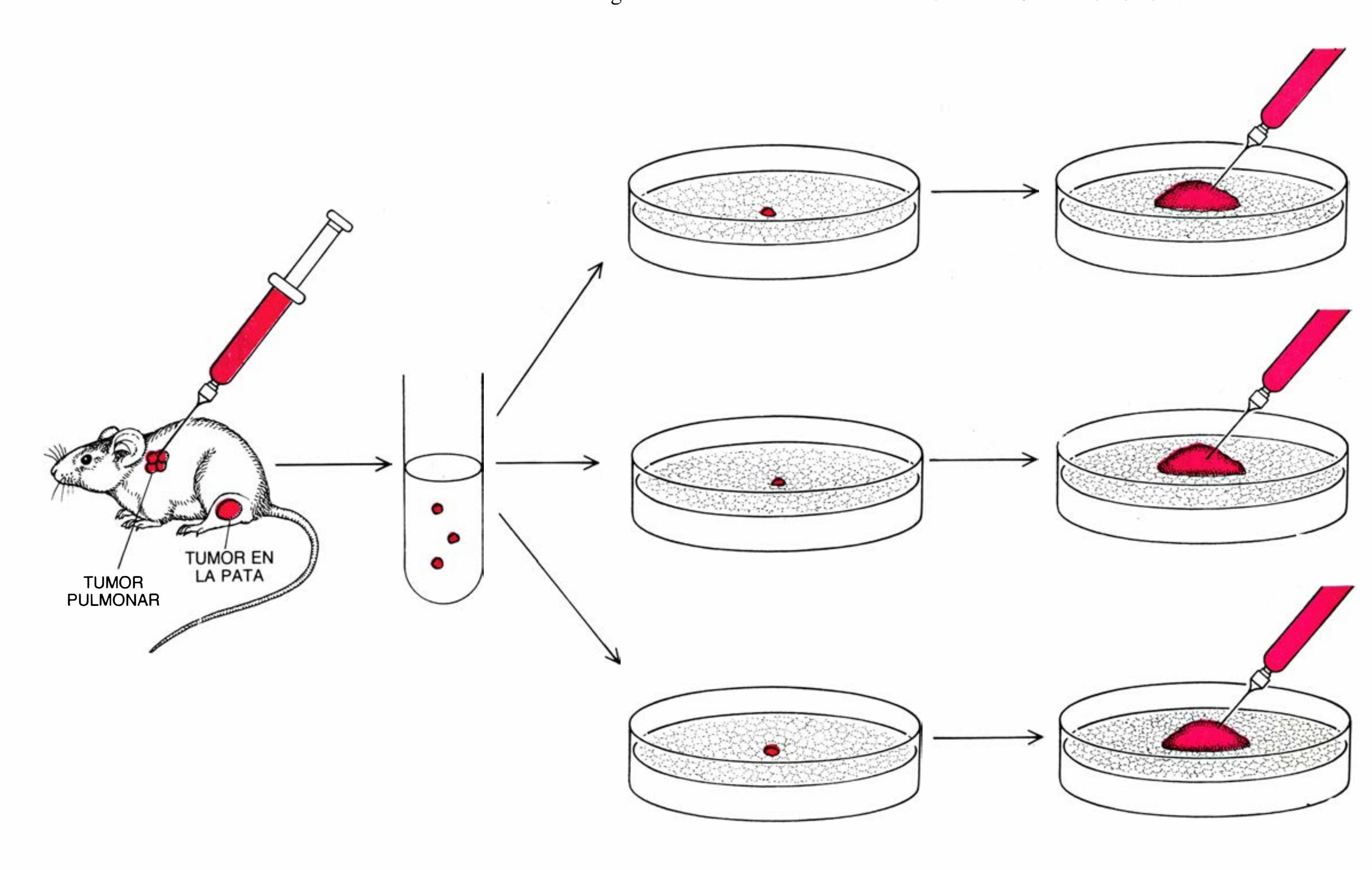
absoluta de H-2K. Dedujimos que el complejo H-2D-antígeno no era inmunológicamente inerte; antes bien, podría realmente suprimir la respuesta inmunitaria, tal como había sugerido el trabajo de Claman.

Una vez establecida la correlación, el paso siguiente consistía en determinar si se podía hablar de una relación causa-efecto. Podríamos explorar esa opción alterando la expresión relativa de los genes H-2K y H-2D en células tumorales en cultivo y tratando luego de ver si el potencial metastásico de las células había cambiado o no. Comenzamos por modificar la expresión génica cultivando las células con sustancias que se sabía que ponían en funcionamiento varios genes, aunque no los relativos al CMH. Obtuvimos unos resultados muy alentadores. Las células tumorales cultivadas con ácido retinoico, por ejemplo, mostraban una expresión incrementada del H-2D; después de siete días en cultivo con ácido retinoico, las células *A*9, no metastásicas, generaban grandes masas de metástasis pulmonares en ratones singénicos.

El tratamiento con las distintas clases de interferón produjo resultados sorprendentes, aunque coherentes también con nuestra hipótesis. Según veíamos, los diferentes interferones, alfa, beta y gamma, afectaban a diferentes genes. Los interferones alfa y beta administrados en tandem ponían en funcionamiento el gen H-2D mejor que el gen H-2K, en tanto que el interferón gamma prefería desenvolverse al revés: insta la actividad del gen H-2K mejor que la del gen H-2D. En consecuencia, la proporción H-2K/H-2D en células tratadas con interferones alfa y beta disminuía, y tanto las células *A*9 como las *D*122 se hacían más metastásicas. El interferón gamma aumentaba la cantidad de H-2K en relación a H-2D y las células *D*122 tratadas daban origen a masas de metástasis mucho menores.

No podíamos tener seguridad todavía de que los cambios en la competencia metastásica que observábamos fueran el resultado específico de la alteración de las proporciones del CMH, porque la acción del ácido retinoico y del interferón no limita sus efectos a los genes del CMH. Por fortuna para nosotros, las técnicas de la ingeniería genética permiten una manipulación más precisa de la expresión génica. En particular, el gen H-2K se había aislado de células de ratones normales; se expresa aquí abundantemente y podría transferirse al clon *D*122, donde apenas si hay expresión del gen H-2K nativo. Después de esa transferencia, la discrepancia en la potencia metastásica de *D*122 podría atribuirse a la actividad del ingreso de H-2K.

Un alumno de doctorado de nuestro laboratorio, Daniel Plaksin, llevó a cabo esta transferencia, llamada también transfección, con plásmidos [*véase la figura 5*]. Esos fragmentos circulares de ADN actúan de vectores y portan el gen H-2K de la célula normal al núcleo de la célula *D*122; en el ADN de esta última insertan el gen. Descubrimos que los "transfectantes" H-2K en cuestión albergaban hasta seis copias del gen H-2K introducido. En estas células, el nivel de la expresión de H-2K superaba el de H-2D; vimos, en efecto, que la proporción H-2K/H-2D, en los transfectantes *D*122, superaba incluso la del clon *A*9 no metastásico.



4. ENSAYOS DE COMPETENCIA METASTASICA. Nos indican que las células de un tumor podrían diferir entre sí por lo que respecta a su capacidad de formar metástasis. Se separaron y se cultivaron individualmente células extraídas de un tumor de pulmón de ratón. Cada una dio origen a una población de células idénticas, un clon. Las células de cada clon se transplantaron luego a ratones. Todos los clones produjeron un tumor primario en el sitio del trans-

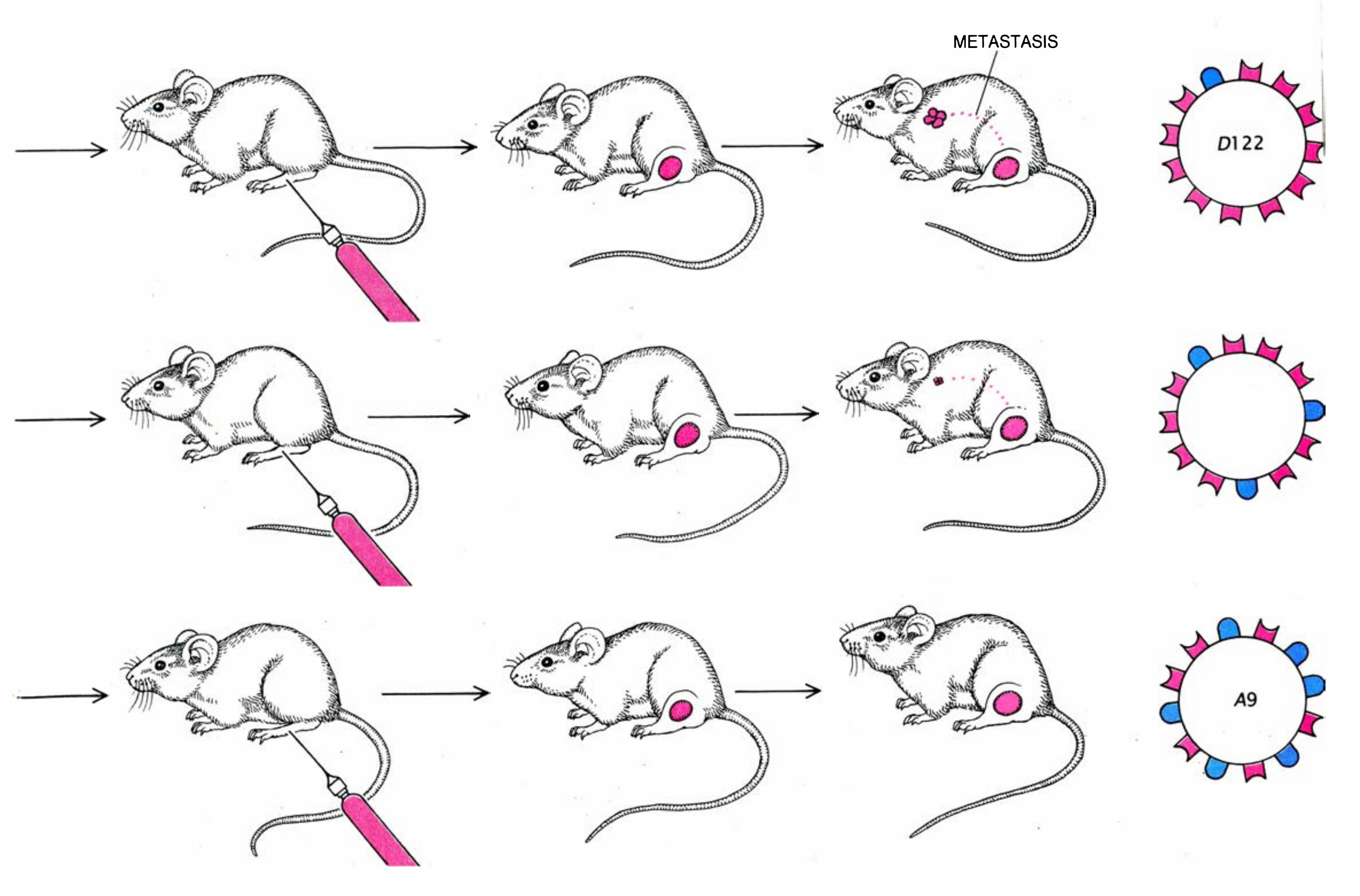
Transplantamos los clones transfectantes a ratones singénicos. ¿Qué observamos? Hallamos que se desarrollaban tumores en la zona del transplante; si bien, en siete de cada nueve casos, la masa de metástasis pulmonares era pequeña o no existía. Estábamos, pues, ante una prueba inequívoca de que la alteración de la expresión de moléculas del CMH podía convertir un clon altamente metastásico en otro sin apenas potencial metastásico.

Repetimos los experimentos, ahora con genes H-2K extraídos de cepas de ratones muy dispares. Obtuvimos resultados similares. Nos preguntamos entonces si el hallazgo a que habíamos llegado alcanzaba a otros tipos de tumores. Generalizamos la investigación al sarcoma T10. Los experimentos con el sarcoma fueron similares a los realizados con los clones 3LL; participaron Shulamit Katzav, alumno de doctorado de nuestro laboratorio, Shraga Segal, entonces en nuestro laboratorio y ahora en la Universidad Ben Gurión del Negev, y Günther J. Hämmerling, del Centro Alemán para la Investigación del Cáncer, en Heidelberg. También los resultados vinieron a coincidir: mediante la transferencia de genes conseguimos abolir las propiedades metastásicas de las células tumorales.

Pensamos en la posibilidad de utilizar transfectantes H-2K, altamente inmunógenos, para inmunizar ratones contra metástasis tumorales. ¿Era posible? En el curso de una enfermedad maligna, el sistema inmunitario golpea preferentemente, eso parece, a las células dotadas de una elevada proporción H-2K/H-2D; no ataca, sin embargo, a las células que sólo tienen bajo nivel de expresión de H-2K. Ahora bien, si la respuesta inmunitaria de un animal adquiriera una potencia relevante, hasta las células tumorales portadoras de baja densidad de H-2K en su superficie podrían tornarse sensibles.

Plaksin y Cochava Gelber, otro alumno de nuestro laboratorio, inmunizaron los ratones mediante células *D*122 transfectadas con H-2K; se las había irradiado antes hasta dejarlas inactivas. Transplantaron luego, del clon *D*122 a los ratones, metastizantes vigorosos. Los ratones que no habían sido inmunizados adquirían una gran carga de metástasis pulmonares; no aparecían metástasis en los ratones inmunizados. Sirvieron de control animales que fueron "inmunizados" con células *D*122 inactivadas; después del transplante de células *D*122 normales, estos animales mostraban cargas mensurables de metástasis en el pulmón [*véase la figura 6*].

Podíamos, pues, prevenir la metástasis mediante la inmunización con transfectantes H-2K. ¿Cabría, de manera semejante, detener las metástasis una vez detectado ya el tumor? Plaksin transplantó células *D*122 a ratones sanos; una semana después, cuando había aparecido un tumor primario, empezó la inoculación semanal de ratones con células H-2K transfectadas. Al cabo de tres semanas, la carga de metástasis pulmonares en los animales inmunizados había descendido significativamente, si se comparaba con la carga de los ratones control sin inmunizar. Tal estrategia podría funcionar, en teoría, para la inmunoterapia de humanos. A fin de asegurarse de que las células



plante, pero generaron cantidades muy variables de metástasis en los pulmones. Los autores descubrieron que el potencial metastásico de un clon estaba relacionado con la proporción de moléculas del CMH, es decir, de H-2D respecto a H-2K, que había en la superficie de la célula; cuanto mayor era la proporción, menos metastásico era el clon (*derecha*). Denominaron *D*122 a uno de los clones más metastásicos y *A*9 al menos metastásico. (Recreación de Patricia J. Wynne.)

usadas para la terapia fueran histocompatibles, habrían de recogerse de un tumor primario del paciente y proceder luego a su transfección.

Conviene resaltar que ninguna de nuestras inmunizaciones impidió el desarrollo del tumor primario. Según parece, cuando el tumor primario ha alcanzado proporciones suficientes para ser "advertido" por el sistema inmunitario, posee también ya magnitud suficiente para resistir la reacción inmunitaria, a pesar de que el sistema inmunitario esté alertado de antemano mediante inmunización. Sin embargo, en experimentos llevados a cabo por Hilliard Festenstein y sus colegas, del Hospital Clínico de Londres, las células extraídas de un linfoma de ratón ni siquiera podían establecer un tumor local si habían recibido la transfección de H-2K antes de ser transplantadas. Por contra, las células transfectadas proliferaban en ratones con el sistema inmunitario arruinado por culpa de la radiación. Diríase que, en ciertos casos, el sistema inmunitario puede incluso anular el crecimiento del tumor primario.

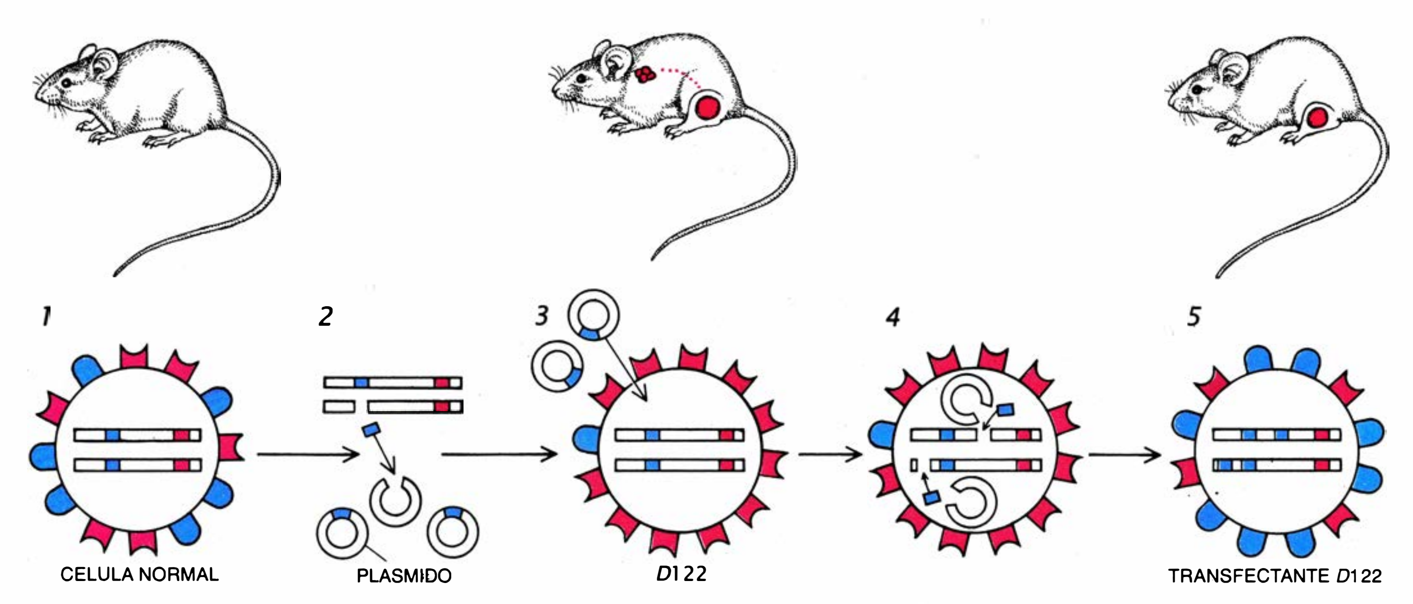
Los experimentos que acabamos de reseñar demuestran que las moléculas del CMH son uno de los determinantes de la competencia metastásica; pero, ¿son el único determinante? Podríamos responder a la pregunta sin gran dificultad comparando la cuantía de metástasis existentes en ratones inmunodeprimidos, que habían recibido transplantes de clones metastásicos y clones no metastásicos. Si las proporciones de moléculas del CMH constituyeran el único factor implicado en la potencia metastásica, las cargas metastásicas de estos ratones serían idénticas. Cierto es que los clones no metastásicos generan metástasis pulmonares en ratones inmunosuprimidos; ahora bien, la carga de metástasis generada en estos animales por clones metastásicos es superior. Hay, pues, alguna otra propiedad o propiedades que deben pesar a la hora de determinar la competencia metastásica. Centramos la investigación en esas propiedades; decidimos examinar los productos de los oncogenes.

Los oncogenes son genes que contienen las células normales y que, activados por mutación o por translocación, contribuyen a la proliferación de un tumor, es decir, a la tumorigénesis. En su estado natural, los genes se denominan proto-oncogenes; con frecuencia, su expresión forma parte importante de la actividad de la célula normal. La existencia de oncogenes fue postulada a finales de la década de 1970, cuando Robert A. Weinberg, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, mostró que, al infectar células normales con ADN de células tumorales, aquéllas se "transformaban" y convertían en células cancerosas. Desde entonces se han identificado y aislado más de 40 oncogenes específicos, aunque seguimos sin saber cuánto y cómo los oncogenes controlan la adquisición de propiedades cancerosas; ignoramos algo más importante desde nuestro punto de vista: si controlan o no la manifestación de las metástasis.

Una manera de abordar la cuestión es preguntarse si la competencia metastásica tiene algo que ver con el rendimiento de la transformación. En el caso de que hubiera esa dependencia, el ADN procedente de clones metastásicos debería diferir, en su capacidad para transformar células normales, del ADN de clones no metastásicos. Acometimos ese tipo de experimentos de transferencia de ADN utilizando clones de diversas potencias metastásicas, procedentes del carcinoma 3LL y de líneas del sarcoma T10. No encontramos ninguna correlación entre eficacia metastásica y transformante. Inferimos, pues, que la transformación de las células normales en células cancerosas y el avance desde un tumor benigno hacia un tumor metastásico son procesos distintos que no se apoyan en los mismos oncogenes.

Cabía, sin embargo, la posibilidad de que la competencia metastásica estuviese determinada por oncogenes no implicados en la transformación inicial. Nos serviría de ayuda en nuestra investigación, eso pensamos, saber cuál de los oncogenes conocidos operaba en nuestras células tumorales del ratón, si es que intervenía alguno de ellos. Analizamos los clones procedentes del carcinoma y del sarcoma mediante sondas para detectar oncogenes conocidos. Aparecieron varios; uno, el *myc*, se daba desmesuradamente en las células carcinomatosas (hasta 60 copias por célula); pero tamaña multiplicación era equiparable en los clones metastásicos y en los no metastásicos; no había que suponer, pues, ninguna relación con la potencia metastásica.

Otro de los oncogenes se mostró más intrigante. Nos sorprendió que el oncogén *fos* se expresara en los clones de bajo y nulo poder metastásico, y no lo hiciera en las células altamente metastásicas. En este aspecto se parecía al

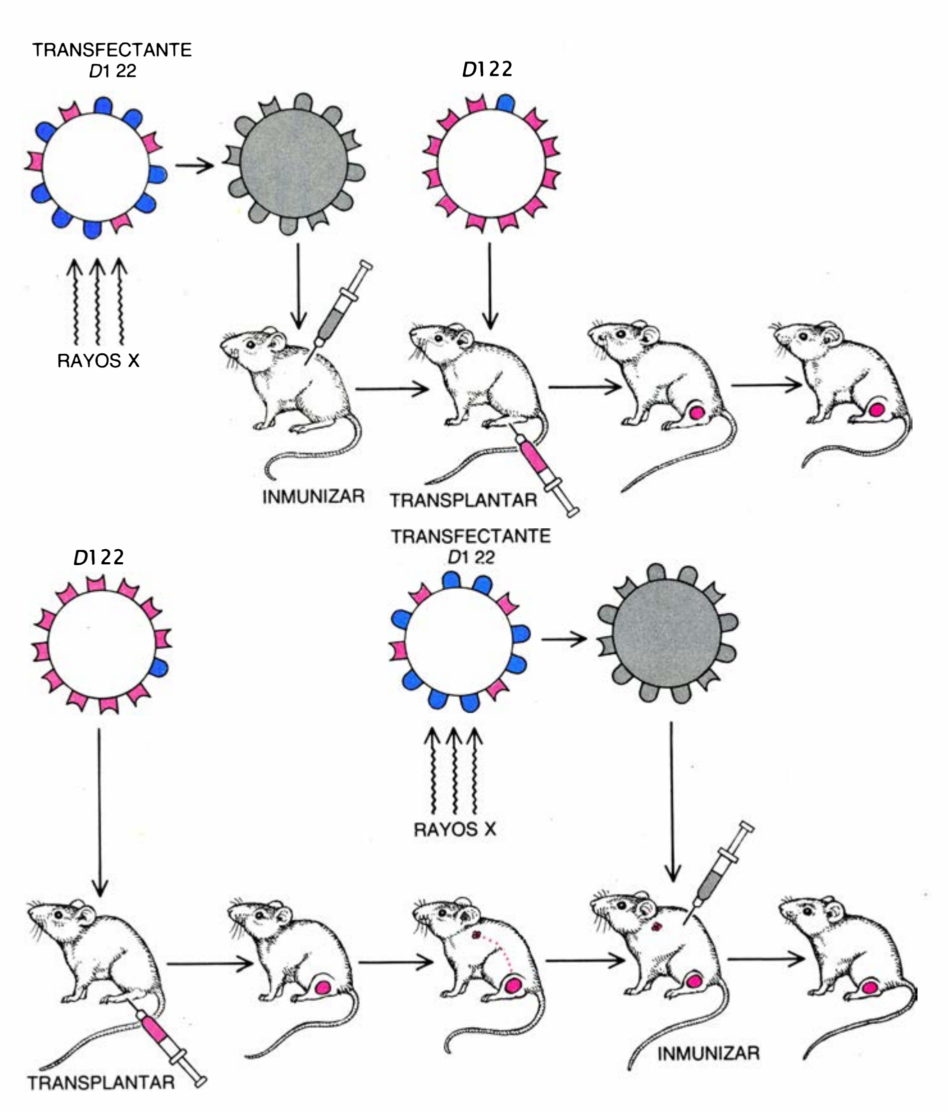


5. TRANSFECCION de células *D*122, metastásicas, con el gen H-2K de células normales de ratón; reduce la capacidad metastásica de las *D*122. Para producir la transfección, el gen H-2K se incorpora en plásmidos, que son trozos de ADN circular, que se emplean habitualmente para transferir genes (*1-2*). Los plásmidos insertan varias copias del gen H-2K en el material genético de *D*122 (*3-4*). Tras lo cual, las células transfectadas expresan más H-2K que H-2D (*5*).

gen H-2K. ¿Tendría el gen *fos* algo que ver con la regulación de los genes del CMH? En colaboración con Joshua Barzilay, que trabajaba en nuestro laboratorio, demostramos que el incremento en la producción de H-2K que provocaba el interferón gamma en el clon metastásico *D*122 iba precedido por la activación del gen *fos*. Más tarde, Gil Kushtai, de nuestro grupo también, transfectó células *D*122 con el gen *fos* del ratón y con sus análogos vírico y humano. En todos los casos, se expresó el gen H-2K "durmiente" en las células *D*122 y aparecieron moléculas H-2K en la superficie celular. Una vez más, la expresión de H-2K comenzó tras la activación del gen *fos* transfectado. Parecía, pues, que éste ponía en marcha la expresión del gen nativo H-2K del CMH de las células *D*122. Como era de esperar, acabamos de comprobar que la capacidad de formar metástasis disminuye también de manera significativa cuando introducimos el gen *fos* en las células *D*122.

Se observó la misma conexión entre la activación de *fos* y la expresión del CMH en células leucémicas humanas. No parece que *fos* sea uno de los oncogenes implicados en la leucemia humana; no suele estar activado en estas células. Sin embargo, las células leucémicas mantenidas en cultivo pueden verse inducidas, mediante varias sustancias, a adoptar de nuevo las características y las pautas de crecimiento de las células sanguíneas normales; cuando esto ocurre, puede cambiar el perfil de moléculas del CMH en su superficie. Se ha asociado la maduración de los macrófagos a una creciente densidad de moléculas del CMH sobre la superficie de la célula. La maduración hasta llegar a granulocitos está asociada a la desaparición de antígenos del CMH.

¿Podría correlacionarse la actividad de *fos* con estos cambios en las moléculas del CMH? La respuesta es sencillamente sí. Cuando provocábamos que las células leucémicas madurasen en macrófagos, se expresaba el gen *fos*; aparecían, a continuación, antígenos del CMH sobre la superficie de las células. *Fos* no se activaba si inducíamos, por contra, la maduración de las células leucémicas en granulocitos.



6. INMUNIZACION CONTRA LA METASTASIS mediante células *D*122 transfectadas. En un experimento llevado a cabo por los autores, se inoculó, en ratones sanos, células transfectadas que se habían inactivado con rayos X y, por tanto, no podían formar tumores. Los autores transplantaron luego células *D*122 metastásicas a los ratones inoculados (*arriba*). Los animales desarrollaron tumores primarios, pero no metástasis en el pulmón. En otro experimento, se inyectó, en ratones en los que ya se habían inducido tumores primarios y secundarios, el transfectante *D*122 inactivado. Las metástasis disminuyeron. Por lo que se ve, las células *D*122 transfectadas provocan una respuesta inmunitaria de potencia suficiente para destruir células altamente metastásicas, así como tumores secundarios. Esa respuesta inmunitaria, sin embargo, no manifiesta la contundencia suficiente para destruir el crecimiento primario de un clon metastásico.

Daba la impresión de que nuestras conclusiones acerca del papel del gen *fos* en el control de la expresión del CMH en el carcinoma de ratón podían tener un interés más general. Era cierto. De acuerdo con las correlaciones que observamos en estos experimentos, podemos afirmar que el producto del gen *fos* controla la expresión de los genes del CMH en las células normales.

Las conexiones que nosotros descubrimos que existen entre el oncogén *fos*, la expresión del gen del CMH y la competencia metastásica ampliaron nuestros conocimientos acerca de las interacciones entre células metastásicas y sistema inmunitario. Pero habíamos iniciado el análisis de los oncogenes con la intención de averiguar las propiedades de las células metastásicas que *no* guardaban relación con su inmunogenicidad. Al seguir con el escrutinio, nos encontramos con lo siguiente. Dimos con un gen, hasta entonces sin identificar, que se expresaba preferentemente en los clones metastásicos, del carcinoma 3LL y del sarcoma T10. Se suponía que la sonda de que nos servíamos debía detectar un oncogén *fms*, que codifica un receptor, de la superficie celular, de un factor de crecimiento que estimula la maduración de la célula sanguínea. Sin embargo, el gen que nosotros encontramos determinaba un producto de mayor tamaño que el del oncogén *fms*, aunque similar. ¿Podría ese gen no identificado codificar también el receptor de un factor de crecimiento?

Hemos examinado las membranas de células altamente metastásicas y hemos descubierto que poseen las propiedades bioquímicas que caracterizan a los receptores de factores de crecimiento situados en la superficie celular. Hemos descubierto también que las células metastásicas procedentes de otros tumores del ratón que originan metástasis en el pulmón expresan, a su vez,

un gen parecido al oncogén *fms*. John Gubbay, alumno de nuestro laboratorio, se ha propuesto clonar el gen y esbozar sus rasgos definitorios. Sospechamos que el gen codifica un receptor que reconoce algún factor específico del desarrollo de tejido pulmonar.

La idea, atractiva, culmina nuestra lista de comparaciones entre células tumorales metastásicas y sin metastizar. Nuestras investigaciones con enzimas sugieren que la mayoría de las células tumorales están capacitadas para invadir la matriz intercelular y penetrar a través de la pared de los vasos sanguíneos. El trabajo que hemos llevado a cabo con moléculas del CMH muestra que algunas células sobreviven mejor que otras después de viajar por el torrente circulatorio, gracias a que pueden evadirse del ataque de las células *T* asesinas. Empezamos ya a entender por qué razón unas células tienen más facilidad que otras para formar tumores nuevos cuando llegan a su destino: podrían, quizás, transportar un receptor de un factor de crecimiento que promueva su proliferación.

Nos gustaría saber cuánto de lo que hemos averiguado puede aplicarse a la oncología humana. Con ese propósito colaboramos con investigadores del Memorial Sloan-Kettering Cancer Center de Nueva York. Nuestra primera etapa es investigar hasta qué punto, en los seres humanos, la competencia metastásica viene también determinada por la proporción de los principales tipos de histocompatibilidad. Si los principios que hemos establecido para los tumores murinos son aplicables al cáncer humano, habremos contribuido a allanar el camino que conduce a una posible inmunoterapia de estas dolencias malignas. Mientras tanto, nuestros planes se limitan a la investigación básica con ratones, en busca de otros determinantes de la metástasis tumoral.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

METASTASIS RESULTS FROM PREEXISTING VARIANT CELLS WITHIN A MALIGNANT TUMOR. Isaiah J. Fidler y Margaret L. Kripke en *Science*, vol. 197, n.º 4306, págs. 893-895; 26 de agosto de 1977.

REJECTION OF TRANSPLANTABLE AKR LEUKEMIA CELLS FOLLOWING MHC DNA-MEDIATED CELL TRANSFORMATION. Kam Hui, Frank Grosveld y Hilliard Festenstein en *Nature*, vol. 311, n.º 5988, págs. 750-752; 25 de octubre de 1984.

MHC GENES AND ONCOGENES CONTROLLING THE METASTATIC PHENOTYPE OF TUMOR CELLS. Lea Eisenbach, Gil Kushtai, Daniel Plaksin y Michael Feldman en *Cancer Reviews*, vol. 5, págs. 1-18; 1986.

Ciencia y sociedad

Buenos réditos

Aunque sin duda muy eficiente, la perspectiva de que con única relación sexual tenga hijos durante toda la vida, podría parecerle bastante aburrida a cualquier mujer. Las hormigas y otros himenópteros sociales, como las abejas y las avispas, no lo conciben de otro modo. Esos insectos sólo se aparean una vez y, en menos de una hora, la hembra debe almacenar todos los espermatozoos que vaya a necesitar en el futuro.

¿Cómo administran los gametos masculinos que han acopiado? Walter R. Tschinkel y Sanford D. Porter, de la Universidad estatal de Florida, determinaron que, en promedio, las reinas de *Solenopsis invicta*, una hormiga, gastaban unos tres espermatozoos por cada obrera adulta que producían. La proporción sorprende incluso entre los insectos; las abejas reina gastan entre 20 y 30 espermatozoos por óvulo. Los mamíferos liberan una cantidad astronómica: para cada fecundación, el macho libera de 200 millones a 600 millones de espermatozoos. El caballo produce entre 4000 y 9000 millones por eyaculación y, el cerdo, hasta 20.000 millones.



REINA DE SOLENOPSIS INVICTA *rodeada de obreras. La hembra de esa hormiga gasta unos tres espematozoos en cada obrera que produce. Esa eficaz gestión de los gametos masculinos que almacena se cuenta entre las más altas del reino animal. La fotografía es de Walter R. Tschinkel*

Los expertos, que presentan sus hallazgos en un número reciente de *Annals of the Entomological Society of America*, trabajaron con *S. invicta* que, según se sabe, sólo se aparea una vez, durante el vuelo nupcial. Se recolectaron reinas recién inseminadas y se realizó el recuento de los espermatozoos alojados en la espermateca, un saco especializado del tracto reproductor donde se almacena.

Dividiendo el número de células germinales guardadas en el saco (en promedio, siete millones) por el número total de obreras producidas durante los siete años que dura el ciclo de vida de la reina (unos 2,6 millones), Tschinkel y Porter calcularon que la abeja dedicaba 2,6 espermatozoos a cada obrera. Según afirma Tschinkel, es probable que la eficacia en el empleo de los espermatozoos resulte aún mayor, pues los autores no incluyeron en los cálculos la mortalidad en las fases anteriores a la adulta. Si la mortalidad en dichos estadios fuera elevada, la proporción descendería hasta sólo uno o dos espermatozoos por célula.

¿Se da en alguna otra especie un uso tan eficaz de las células germinales? El nemátodo *Caenorhabditis elegans* sólo produce un espermatozoo por óvulo, pero esa especie es hermafrodita y los dos gametos coinciden en el tiempo y en el espacio. ¿Por qué *S. invicta* gestiona con tanta eficacia su provisión de espermatozoos? No se sabe. Según Tschinkel, "no es un asunto al que se le haya dedicado mucha atención".

Recuerdos maternos

Muchos enfermos que necesitan un trasplante renal no encuentran donante compatible. Observaciones recientes de candidatos al trasplante arrojan, sin embargo, una luz de esperanza sobre el futuro de las víctimas de insuficiencia renal: podría ampliarse el grupo de donantes compatibles.

La propensión del sistema inmunitario a destruir los tejidos que le parecen extraños, "no propios", limita el conjunto de donantes. Los rasgos inmunológicos principales de cualquier órgano trasplantado, aquellos ante los que responde el sistema inmunológico del receptor, son las proteínas que constituyen los antígenos de histocompatibilidad de la clase I; las recibimos de nuestros progenitores, la mitad de cada uno. En una población existen varias docenas de antígenos de la clase I, por lo que cuesta encontrar órganos donantes que coincidan con el receptor en todos ellos. No siempre resulta imprescindible la coincidencia absoluta, pero sí lo es en un 15 por ciento de los candidatos a trasplante renal: por haber recibido numerosas transfusiones sanguíneas, o por el rechazo de un trasplante anterior, su sistema inmunitario se ha hipersensibilizado. Esos enfermos generan anticuerpos contra la mayoría de los antígenos de la clase I que difieren de los suyos.

Frans H. J. Claas, Jon J. van Rood y sus colegas, de la Universidad de Leiden, analizaron el suero sanguíneo de enfermos hipersensibilizados para comprobar si tolerarían tejidos que presentaran antígenos de la clase I bastante coincidentes, aunque no del todo. Comprobaron, según exponen en *Science*, que, para la mayoría de los enfermos, podía hallarse uno o más antígenos que no instaran respuesta inmunológica. Se realizaron los trasplantes y en gran proporción los órganos fueron aceptados.

Posteriormente, los autores advirtieron que, en 15 de los 26 casos estudiados, los antígenos no coincidentes que los enfermos habían tolerado los portaban sus madres y no se los habían transmitido. Los antígenos del padre no presentaban ese fenómeno.

En explicación del hecho, los autores sugieren que, durante el embarazo, algunas células de la madre se cuelan al torrente sanguíneo del feto, cuyo sistema inmunitario, en pleno desarrollo, "aprendería" a tolerar los antígenos maternos de la clase I como si se tratara de los suyos. Según parece, el "recuerdo" inmunitario de los antígenos maternos perdura hasta la madurez.

De confirmarse en estudios más extensos, el hallazgo "podría ejercer un profundo impacto sobre la práctica clínica del trasplante renal", opina Richard J. Glassock, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles. Los primeros resultados de Claas y van Rood sugieren que del 30 al 40 por ciento de los pacientes hipersensibilizados, cuya probabilidad actual de encontrar un órgano apropiado es escasa, podrían recibir órganos que, sin ser coincidentes, por-

taran antígenos maternos. El descubrimiento facilitaría también la identificación de donantes de otros órganos.

De cómo el polluelo de cisne se convierte en fénix

Mientras los aceleradores creados por el hombre fracasan en su esfuerzo por producir el bosón de Higgs y otros constituyentes fundamentales de la materia, el cosmos cumple cabalmente con su misión de caja de Pandora.

La historia arranca de 1983, cuando un grupo de investigadores de la Universidad de Kiel observaron que las lluvias de rayos cósmicos que proceden de Cygnus X-3, la fuente más intensa de rayos X de nuestra galaxia, producían 10 veces más muones de lo esperado. El muon es una partícula subatómica, casi idéntica a un electrón, aunque con una masa 200 veces mayor.

Los resultados de Kiel fueron patrimonio de unos cuantos especialistas hasta 1985. Ese mismo año, diversos grupos de investigadores, que trabajaban con detectores subterráneos de la desintegración del protón, anunciaron flujos de muones procedentes de Cygnus X-3 mucho mayores que los que venían de otras direcciones del firmamento. Además, ese flujo coincidía con el mayor chorro de rayos cósmicos de Cygnus X-3 registrado hasta entonces.

Cuando esos datos se hicieron públicos, los físicos parecieron caer en un frenesí de especulación desenfrenada. ¿Por qué? Las lluvias de rayos cósmicos se desencadenan cuando muchas partículas, protones sobre todo, inciden en la alta atmósfera terrestre y producen una cascada de partículas secundarias, entre las que se encuentran los muones, que se registran en los rayos cósmicos que llegan a los detectores. Pero los muones son partículas inestables: la vida media de un muon con la energía con que habitualmente incide en el detector es de unos seis milisegundos y, sin embargo, Cygnus-X-3 se halla a unos 40.000 años-luz de distancia. Por consiguiente, resulta imposible que los muones viajen hasta la Tierra sin desintegrarse; así pues, no se registran partículas primarias, sino partículas secundarias producidas por colisiones de aquéllas cerca del detector.

Al no haber ninguna partícula primaria conocida que permitiera explicar el fenómeno, se denominó a esta hipotética partícula, creadora de la lluvia de muones, "polluelo de cisne", en alusión a su origen cósmico. Esta partícula primaria ha de ser eléctricamente neutra; si así no fuera, el campo magnético de la galaxia la desviaría de su trayectoria recta entre Cygnus X-3 y la Tierra.

Quedó descartado qaue los polluelos fueran neutrones, partículas eléctricamente neutras; su inestabilidad les impide soportar, sin desintegrarse, los 40.000 años que dura el viaje desde Cygnus hasta nuestro planeta. ¿Eran acaso fotones o neutrinos? No se conocía, sin embargo, ninguna reacción de los fotones o neutrinos con los detectores que produjera muones en la cantidad en que se medían. En 1985 los físicos perdieron la compostura y lanzaron una hipótesis osada: Cygnus X-3 sería una estrella de quarks, que emitía pequeños paquetes de materia en forma del quark extrañeza: los "polluelos", de carga eléctrica neutra.

Como ocurre a menudo, estos resultados cayeron en el olvido a falta de réplica. Pero acaban de renacer de sus cenizas. Investigadores de la Universidad de Maryland en College Park, de la Universidad George Mason y del Laboratorio de Los Alamos de la Universidad de California en Irvine han anunciado la observación de unos resultados tan sorprendentes como los que comentamos, en la lluvia de rayos cósmicos que se observó en julio de 1986 procedente de Hércules X-1.

Lo mismo que Cygnus X-3, Hércules X-1 es un sistema binario, compacto, formado por una estrella de neutrones y una compañera cuya masa multiplica varias veces la solar. También igual que Cygnus X-3, el sistema binario es fuerte emisor de rayos X y de fotones muy energéticos y está asociado a la lluvia de rayos cósmicos.

Durante la lluvia de 1986 se detectaron 17 "chaparrones" procedentes de Hércules X-1, mientras que en situaciones normales se registran únicamente tres. No se puede atribuir la intensidad desacostumbrada de las emisiones procedentes del sistema binario a las fluctuaciones aleatorias que experimentan las estrellas, cuya probabilidad se cifra en 0,0001. Además, la cantidad de muones que se detectó fue un orden de magnitud superior al número de muones que se mide cuando las partículas primarias de los rayos cósmicos son fotones de gran energía y bastante superior al número de muones producidos durante las lluvias de rayos cósmicos desencadenadas por protones.

Aunque los resultados de Hércules X-1 son independientes de los obtenidos de Cygnus X-3, la pregunta que plantean es la misma. El "polluelo", después de haber perdido su protagonismo hace tres años, renace de sus cenizas y da nuevas oportunidades para la libre especulación.

La NASA se mueve

Cuando se trata de predecir el futuro de la ciencia espacial norteamericana las personas vinculadas al proyecto no ocultan su optimismo. Lennard A. Fisk, jefe del departamento de ciencia del espacio y aplicaciones de la NASA, se muestra seguro y feliz. "Entraremos en un período de actividad sin precedentes. Hay que ganar el tiempo perdido en los retrasos ocasionados por el accidente del *Challenger*. Nuestros deseos van, sin embargo, más lejos. Esa actividad mantendrá su ritmo. Tenemos razones para pensar que así va a ocurrir."

La razón de este optimismo es obvia. El 29 de septiembre, el programa espacial de la NASA cerró el intervalo de dos años y ocho meses que siguió al desastre del *Discovery*. Ese mismo día, Canadá, Japón y la Oficina Espacial Europea (ESA) acordaron invertir 8000 millones de dólares para colaborar con los EE.UU. en la instalación, a mediados de los noventa, de la estación espacial "libertad". Estos pasos, en opinión de Fisk, corroboran la esperanza de acometer el estudio de las reacciones de los seres vivos en condiciones de ingravidez. Hay programados 17 vuelos de la lanzadera dedicados a misiones del "Spacelab" en los próximos cinco años; durante los mismos se llevarán a cabo experimentos biológicos y de transformación de materiales. Estos trabajos permitirán futuras investigaciones sobre microgravedad más refinadas.

La reanudación del programa de la lanzadera espacial posibilitará que otras naves destinadas a intereses científicos dejen su pátina de polvo en los hangares y entren muy pronto en servicio. Entre estos ingenios, diseñados para su transporte en la lanzadera, podemos citar el *Magellan*, encargado de cartografiarnos el planeta Venus, y la misión *Galileo* a Júpiter, cuyo lanzamiento se producirá el año en curso; asimismo, el *Hubble Space Telescope*, el observatorio solar *Ulysses* y el *Gamma-Ray Observatory*, programados los cuatro para despegar en 1990. A pesar de que la Casa Blanca ha prohibido el lanzamiento de satélites comerciales y de que el Pentágono está desarrollando su propio sistema de lanzamiento, Fisk

mantiene que la NASA cumplirá su compromiso en lo que concierne a estos ingenios.

Sin embargo, para mitigar la preocupación de los científicos sobre el futuro de sus proyectos, demasiado ligados a los vaivenes de la lanzadera, la NASA ha tomado las primeras medidas para preparar cohetes sin tripulación que aseguren las misiones. En sus talleres se están construyendo cohetes que lanzarán, este mismo año, el Cosmic Background *Explorer*, en 1991 el *Extreme Ultraviolet Explorer* y, un año después, el *Mars Explorer*, por nombrar sólo algunos. La Oficina Norteamericana está asimismo empeñada en conseguir cohetes capaces de impulsar misiones científicas de menor complejidad y que precisen desarrollarse con rapidez, la observación de una nueva supernova quizá. Desde 1991 en adelante, Fisk espera disponer anualmente de dos cohetes de éstos para misiones menores.

Para asegurarse de que el programa de ciencias espaciales goce del firme soporte que lo catapulte hacia el siglo XXI, la NASA iniciará anualmente un proyecto a largo plazo. En ese sentido, estudia un posible observatorio de rayos X que se lanzaría en 1995. El departamento de Fisk recomendó pasar a primer plano el lanzamiento de una sonda que abordaría la conjugación del cinturón de asteroides y Saturno, el desarrollo de un sistema multisatélite de observación de la Tierra y el lanzamiento de un observatorio de infrarrojos. Muchos de estos planes dependen, naturalmente, de las "dádivas" de la Administración y del Congreso. Fisk, optimista empedernido, señala que en el presupuesto de 1989 estos temas han recibido bastante mejor tratamiento que otros.

James A. Van Allen de la Universidad de Iowa, descubridor de los anillos de radiación que llevan su nombre, aplaude los objetivos de Fisk, aunque pone sordina a tanto triunfalismo. En su opinión, mientras la NASA esté comprometida en grandes programas de vuelos tripulados, las misiones científicas serán más vulnerables a los recortes presupuestarios. Van Allen teme que la estación espacial pueda convertirse, al igual que lo es ya la lanzadera, en un programa que consuma buena parte del presupuesto y sólo deje migajas para el propio desarrollo de las misiones científicas. Criterio que comparte Thomas M. Donahue, de la Universidad de Michigan, jefe del grupo de ciencias espaciales de la Academia Nacional, quien va más allá y pone en cuestión la utilidad de las misiones tripuladas en el desarrollo de la astrofísica.

Nobel de física 1988

Tres americanos han sido galardonados por un experimento realizado en los años sesenta con haces de neutrinos. Son éstas unas partículas escurridizas que nacieron en 1931, postuladas por Wolfgang Pauli, quien propuso su existencia para preservar así la conservación de la energía en la desintegración beta nuclear. Poco después, el físico italiano Enrico Fermi recogió la hipótesis de Pauli y admitió la existencia de una partícula de masa cero (o casi cero), eléctricamente neutra, a la que llamó neutrino, que le permitía desarrollar su teoría de la desintegración β. Unos veinte años más tarde, en 1956, Frederick Reines y Clyde L. Cowan confirmaron experimentalmente la existencia de un neutrino asociado con los electrones.

En los años sesenta a los físicos teóricos les venía estrecho el conocimiento aceptado de la fuerza nuclear débil, involucrada directamente en las desintegraciones radiactivas. Algunos sospechaban que en la desintegración podían hallarse implicados varios neutrinos. La realización de un experimento que produjera un haz de neutrinos muy energéticos aclararía el misterio, pero nadie sabía de qué modo acometerlo. Fueron Leon M. Lederman, del laboratorio del acelerador Fermi, Melvin Schwartz, de Digital Pathways, Inc., y Jack Steinberger, del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares, quienes resolvieron el problema. Son los premiados con el Nobel de física 1988.

A comienzos de los sesenta, los tres trabajaban conjuntamente en la Universidad de Columbia. En el acelerador del laboratorio de Brookhaven, lanzaron protones contra un blanco de berilio. De la colisión brotaba un denso haz de partículas, algunas de las cuales se transformaban en neutrinos. Este haz de partículas incidía sobre una pared de unos 14 metros de grosor, hecha de planchas de acero procedentes del desguace de buques de guerra; el muro filtraba todas las partículas menos los neutrinos, que lo atravesaban y llegaban al detector.

Durante ocho meses, a caballo entre 1961 y 1962, el acelerador generó unos 100 billones de neutrinos, de los que el detector registró sólo 51 billones. El experimento sirvió para confirmar que

había dos clases de neutrinos al menos: uno asociado al electrón y otro asociado a una partícula mucho más pesada y de carga eléctrica negativa, el muon. Este descubrimiento, con otros que nacieron de varios experimentos con haces de neutrinos, aportó las bases sobre las que descansan las teorías que afirman que la fuerza nuclear débil y el electromagnetismo son dos aspectos de una misma fuerza: la electrodébil.

Entre las cuestiones que siguen abiertas hay una crucial cuya solución reportaría sin duda el preciado galardón que motiva esta nota. ¿Puede la atracción gravitatoria entre las miríadas de neutrinos detener la expansión ilimitada del universo y evitar, por tanto, que acabe convertido en un vacío frío y oscuro?

Nobel de química 1988

La imagen de la luz del sol bañando con sus rayos un campo donde crece la hierba que después come una ternera cuya carne alimenta a un ser humano sirve para poner de relieve el papel decisivo que la fotosíntesis desempeña en el mantenimiento de la vida sobre la tierra, un proceso cuya mecánica hasta hace poco era un misterio. El premio Nobel de química de 1988 se ha concedido a Johann Deisenhofer, del Instituto Médico Howard Hughes, Robert Huber, del Instituto Max Planck de Bioquímica, y Harmut Michel, del Instituto Max Planck de Biofísica, por desentrañar la estructura de un complejo de proteínas que viene a ser el motor de la fotosíntesis en ciertas bacterias.

El complejo de proteínas se aloja en la membrana externa de la bacteria. Desde allí se prolonga hacia el interior y el exterior celular. Estas proteínas de membrana intervienen en procesos biológicos relacionados con el transporte de energía a través de las paredes de la célula. Los biólogos no habían conseguido determinar la estructura de estas proteínas de membrana porque resultaba extremadamente difícil prepararlas en la forma cristalina que requería la cristalografía por rayos X.

En 1982 Michel realizó lo que muchos investigadores creían imposible: promovió el desarrollo de cristales de las proteínas de membrana que actuaban como máquinas fotosintéticas de las Rhodopseudomónadas, un grupo bacteriano. Durante los tres años siguientes, Huber y Deisenhofer, que se hallaban en el Instituto Max Planck de Bioquímica, analizaron los cristales con rayos X. Acotaron la posición de los 10.000 átomos que forman el complejo proteínico.

Este conocimiento ha permitido adentrarse mejor en la fotosíntesis vegetal, además de la bacteriana. Y habrá de ayudar a explicar la función que cumplen las proteínas de membrana en la diabetes, el cáncer y otras enfermedades.

Nobel de medicina 1988

Para obtener tratamientos más eficaces contra la enfermedad se pueden seguir dos caminos: el método de ensayo y error o el conocimiento de la bioquímica humana. El método empírico ha dominado la investigación durante la mayor parte de la historia de la humanidad. El segundo método constituye un logro reciente. Por su participación en el mismo, Gertrude B. Elion y George H. Hitchings, de la Burroughs Wellcome Company, y James W. Black, del Instituto Rayne de la Universidad de Londres, han obtenido el premio Nobel del año 1988 en fisiología y medicina.

Trabajando juntos en la compañía Burroughs desde 1945, Elion y Hitchings se han esforzado por poner de manifiesto las diferencias, en estructura y función, entre células normales por un lado y, por otro, células cancerosas, bacterias, virus y demás patógenos. El acierto en sus planteamientos les ha permitido diseñar medicamentos para remediar la leucemia, malaria y pneumonía, que rompen la bioquímica patógena pero no la del tejido sano. Sus investigaciones permitieron el desarrollo del aciclovir, un fármaco contra el herpes, y la droga azidotimidina (AZT) aplicada en el tratamiento del síndrome de inmunodeficiencia adquirida.

Black ha centrado su trabajo en la interacción corporal entre distintas sustancias químicas y receptores de la superficie del nervio y de las células musculares. Sus investigaciones posibilitaron la fabricación de los beta-bloqueadores, usados en el tratamiento de la hipertensión y otras cardiopatías, y de antagonistas de los receptores H-2, el producto prescrito para las úlceras.

El comité Nobel elogió el método seguido por Elion, Hitchings y Black, aparte de la creación de medicamentos específicos. De acuerdo con su dictamen, "mientras el desarrollo de medicamentos se basaba en la modificación química de productos naturales, los premiados han introducido una metodología más racional".

Ciencia y empresa

Desequilibrios

Al abrigo de un antiguo convento, no lejos de Santa Fe, Nuevo México, varios economistas pasaron diez días del último verano dándole vueltas a la evolución de las proteínas. Se preocuparon también por descubrir la causa de un fenómeno conocido: si echamos arena encima de un montón anterior, se desencadenan avalanchas de diversos tamaños que bajan por las laderas. Mientras, un grupo de científicos –físicos, especialistas en ordenadores e incluso un biólogo– se pusieron a meditar sobre los mecanismos del mercado de valores y a reflexionar sobre las razones por las que unos países se desarrollan antes que otros.

Aunque la mayoría abandonó Santa Fe, una veintena de los últimos continúan a la caza de nuevas interpretaciones de la actividad económica recurriendo a ideas que les prestan otras disciplinas científicas. Unos han defendido la ruptura radical con los dogmas económicos; otros han pedido prudencia. "No queremos mostrarnos beligerantes con los economistas al uso", agrega Brian Arthur, economista a su vez de la Universidad de Stanford, "pero parece que ha llegado el momento de romper." La visión de la economía ofrecida como un sistema bastante previsible, sujeta a un desarrollo ordenado, ha producido importantes descubrimientos, dice Arthur. Pero la liberación parcial de tales hipótesis, o incluso su abandono de plano, abriría las puertas a una nueva generación de adelantos.

La idea del hiato con lo convencional la aventó un banco. En 1986, John S. Reed, presidente del Citicorp, tenía ante sí un problema de 15.000 millones de dólares en forma de préstamos impagados –y posiblemente impagables– que la compañía había adelantado a países en vías de desarrollo desde las postrimerías de la década pasada. Reed echó las culpas a los errores cometidos por la asesoría. Los modelos empleados por los economistas de aquellos años indicaban la persistencia del rápido crecimiento y la devolución, con intereses, de los préstamos. Años más tarde, no había ya modelos que aliviaran el problema de Reed: la monstruosa deuda que las naciones en vías de desarrollo habían acumulado. Reed, que venía del campo de la ingeniería metalúrgica, apeló a las ciencias cuantitativas. Presenten ustedes un nuevo modelo para explicar el funcionamiento de la economía global, fue el desafío. Hagan ustedes lo que quieran, continuó, pero asegúrense de que no va lastrado con la doctrina al uso.

"Las ocasionales incursiones de los físicos en la economía han caído en el pecado de la trivialidad, aunque no siempre", apostilla Kenneth J. Arrow, premio Nobel de economía. Pero los economistas han tomado prestadas algunas herramientas matemáticas de las ciencias naturales. Pese a ello, Arrow y Philip W. Anderson, premio Nobel de física, encuentran interesante el desafío de Reed. Parecía que una reunión de trabajo de diez días de duración, con participantes escogidos por Anderson y Arrow, debía ser al menos un buen foro donde economistas y científicos intercambiaran ideas y técnicas. Se reunieron en el Instituto de Santa Fe en 1987 y después de nuevo el pasado septiembre; se ha iniciado también el desarrollo de un programa de investigación en economía.

El grupo no ha elaborado todavía ningún modelo que facilite a Reed la toma de decisiones, pero Citicorp es paciente. "El problema de la deuda del Tercer Mundo va a durar por lo menos 15 años", observa Eugenia M. Singer, vicepresidenta de Citicorp. Los investigadores han preferido sumergirse en cuestiones fundamentales: ¿se mueve la economía hacia "puntos de equilibrio", como los economistas han supuesto durante decenios? ¿Podría la economía evolucionar al modo de un ecosistema, resultante de las interacciones entre organismos o agentes que coevolucionan? ¿Es el comportamiento no lineal característica importante de la economía?

El equilibrio dinámico, piedra angular de los modelos económicos tradicionales, constituye un punto cambiante donde la oferta de bienes satisface la demanda de los consumidores. Desde el punto de vista teórico, el equilibrio resulta de una sencillez atractiva; supone, por ejemplo, que, cuando suben los precios, baja la demanda, lo que a su vez hace descender los precios. Estas fuerzas se contrarrestan, pues, entre sí, y conducen el sistema hacia el equilibrio.

Sin embargo, aun cuando las herramientas matemáticas empleadas por los economistas han adquirido mayor complejidad, los modelos parecen todavía desviarse de la realidad de las cosas. En el marco del equilibrio, no ha lugar para una justificación de las fluctuaciones persistentes e irregulares de la economía, en particular la caída del mercado de valores del año pasado. Contrariamente a lo que postula la teoría, la técnica ha ensanchado el abismo entre las naciones ricas y las pobres, en vez de acortarlo. Además, aunque los economistas pueden demostrar matemáticamente la existencia de un punto de equilibrio, resulta casi imposible calcular el punto específico. Tal complejidad crea un obstáculo "filosófico": si los economistas no pueden hallar la solución de un problema, ¿cómo van a hacerlo los productores y los consumidores? Sin embargo, y pese a varios intentos, dice Arrow, nadie ha propuesto todavía un sustituto coherente y general del equilibrio.

Los investigadores que asistieron a la conferencia de Santa Fe están empeñados en su resolución. Consideremos su modelo de una economía dinámica. En este ambiente de constante cambio y movimientos imprevisibles, los agentes se limitan a asegurar su supervivencia y a mejorar un poco su vida. (Los modelos de equilibrio, por otra parte, suponen que los consumidores y proveedores actúan consecuentemente y en forma óptima en un entorno que comprenden.) Los agentes que coevolucionan aprenden tanto a adaptarse a su ambiente como a alterarlo al cambiar ellos.

Los investigadores esperan someter a prueba la idea usando teorías del aprendizaje de máquinas desarrolladas por John H. Holland, especialista en ordenadores de la Universidad de Michigan. El sistema "clasificador" de Holland simulará un mercado de valores en miniatura, habitado por "agentes" (conjuntos de reglas) que truecan dinero por valores. El clasificador genera nuevas reglas combinando las que dan buen resultado y eliminando las que fallan, técnica de cálculo que se conoce como algoritmo genético. Holland y Arthur vigilarán qué reglas tienen éxito bajo diversas condiciones. "Esperamos poner de manifiesto que, partiendo de reglas muy sencillas, el mercado se organizará a sí mismo alcanzando un estado psicológico muy complicado", dice Arthur. Tales resultados probarían que el movimiento del precio de los valores refleja mucho más que los tipos de interés, dividendos y otros parámetros financieros. Aunque

tal conclusión no sorprenda quizás a muchos agentes de cambio y bolsa, representaría una ruptura con la teoría económica aceptada.

Otros investigadores confían en desentrañar la complejidad económica en función de la "criticidad autoorganizativa", noción introducida por Per Bak, físico del Laboratorio Nacional de Brookhaven. Cuando un sistema de esa naturaleza, pensemos en un montón de arena, alcanza cierto umbral, se reorganiza a sí mismo por medio de "pequeñas y grandes avalanchas", y lo hace de una manera estadísticamente previsible, explica Richard G. Palmer, físico de la Universidad de Duke. Anderson y Palmer creen que esta descripción podría ajustarse a la difusión de las nuevas técnicas en la economía. Analizando datos sobre el crecimiento y la producción de las industrias, esperan hallar estructuras similares a las de otros sistemas auto-organizativos.

Los economistas han estudiado, desde hace tiempo, más casos de comportamiento no lineal, en los que bastan pequeñas diferencias en las condiciones iniciales para desencadenar comportamientos ampliamente divergentes a la larga. Los participantes del Instituto de Santa Fe siguen la pista de un número infinito de ideas de ese tenor. Entre ellas está la posibilidad de que el producto de mayor éxito en el mercado pueda no ser el tecnológicamente superior. Antes bien, las opciones de los primeros consumidores pueden crear una realimentación positiva que influye sobre los compradores más tardíos. Otra idea es que el ritmo de introducción de nuevas técnicas en un país dependería del tiempo durante el cual estuvieron en uso otras técnicas relacionadas con ella, así como del coste de adoptar la nueva tecnología. En una nación en vías de desarrollo, un cambio en las técnicas de cultivo podría crear tal demanda de fertilizantes que impulsaría el desarrollo de industrias químicas locales.

Es cierto que la interrelación de ideas procedentes de diferentes disciplinas puede conducir a más trabajo, en vez de aportar soluciones precisas. El año pasado, los participantes de Santa Fe hervían de excitación ante la posibilidad de describir la turbulencia del mercado de valores mediante la teoría del caos, una subdisciplina de la dinámica no-lineal. Ahora, muchos están convencidos de que, mientras el caos puede describir la actividad de los individuos o el comportamiento microeconómico, los datos referentes a las grandes tendencias, la macroeconomía, se ajustan todavía a ciclos regulares, oscurecidos por el "ruido": factores no económicos tales como la política o el tiempo.

Los investigadores advierten también que cualquier modelo físico ha de sufrir un proceso profundo de readaptación antes de que pueda describir con propiedad la actividad económica. "El hablar con los físicos puede ayudarnos", dice Timothy J. Kehoe, economista de la Universidad de Minnesota; "después habrá que trabajar duro". Pero Santa Fe servirá para roturar nueva tierra, dice Arrow, al estimular proyectos interdisciplinares y al sacar la economía del rígido mecanismo del equilibrio para transportarla hacia un sistema de "búsqueda a tientas" más conforme con la evolución de los sistemas ecológicos.

Una copa para el camino

Los combustibles que sustituyan a las gasolinas podrían curar muchas enfermedades energéticas y del ambiente. Lo que no impide que las medidas reguladoras estén exentas de dificultades. A mediados de octubre, el presidente Reagan aprobó una ley que mima al sector del automóvil si fabrica vehículos capaces de funcionar con alcohol. Aunque muchos ambientalistas aprueban el uso de combustibles alcohólicos, sostienen que no es probable que la nueva ley reduzca la contaminación, ni la dependencia exterior de carburantes.

El carburante alcohólico preferido es el metanol, que suele obtenerse del gas natural. (El etanol, carburante alcohólico frecuentemente mezclado con la gasolina para aumentar el índice de octano, cuesta al menos el doble que el metanol.) California tiene ya 550 automóviles en fase de experimentación, muchos de los cuales se han construido para funcionar exclusivamente con M85, una mezcla de 85 por ciento de metanol y 15 por ciento de gasolina; la ciudad de Nueva York tiene seis autobuses que funcionan sólo con metanol puro. Los vehículos "flexibles en combustible", la opción más verosímil, funcionarán con cualquier mezcla de gasolina y alcohol que se eche en el depósito.

Los pros y contras de los diversos combustibles giran alrededor de las emisiones que producen y los costes de cada uno. Los defensores del metanol limpio y del M85 señalan que los hidrocarburos que generan son menos reactivos y consiguientemente crean un menor nivel de ozono que los hidrocarburos de la gasolina. Según un estudio realizado por la compañía Ford en veinte ciudades, excluida Los Angeles, el máximo de formación de ozono se podría reducir entre un tres y un trece por ciento si se empleara M85. A diferencia del combustible diésel, el metano produce muy pocas partículas, y es, por tanto, un combustible mucho más limpio para los camiones pesados. En contra, la combustión del metanol tiene que producir formaldehído, sospechoso de ser carcinógeno, que la gasolina emite en cantidades mínimas.

El metanol puro da lugar a niveles de emisión de hidrocarburos más bajos que el M85, pero el combustible puro presenta algunos inconvenientes. Aunque inodoro e incoloro, es tóxico y se quema con una llama virtualmente invisible que hace difícil ver un incendio por metanol. Su baja presión de vapor puede también hacer difícil el arranque de un motor alimentado por metanol en tiempo frío. Esos inconvenientes han llevado a la Comisión de Energía

de California, que ha dirigido un proyecto de ocho años sobre el metanol, a decidirse por el M85.

Los vehículos proyectados para consumir sólo M85 o metanol puro plantean lo que Charles R. Imbrecht, presidente de la Comisión de Energía de California, describe como "el problema del huevo y la gallina": en ausencia de coches que usen metanol, las estaciones de servicio no acondicionan los depósitos para almacenar ese combustible; sin estaciones de servicio, los consumidores se resisten a comprar coches que carecen de un suministro cómodo. Los coches flexibles pueden ayudar a resolver este problema, dice Imbrecht; los conductores pueden adquirir M85 cuando lo haya, o llenar el depósito con gasolina cuando no lo haya.

Todavía será dificil convencer a los consumidores de que compren metanol. En octubre, el M85 se vendía a unos 85 centavos el galón (unas 21 pesetas el litro), precio comparable al de la gasolina sin plomo aunque rinde solamente la mitad del kilometraje. Los defensores del metanol creen que el precio caerá a medida que las existencias aumenten. Indican, además, que el índice de octano del metanol supera, de lejos, el de la gasolina super, más cara, lo que debe hacerlo atractivo para los propietarios de coches de altas prestaciones.

Pero los conductores que rellenan con gasolina medio depósito de metanol pueden perjudicar el ambiente más de lo que lo favorecen, responden los críticos de la estrategia de combustible flexible. Al mezclar grandes cantidades de gasolina con metanol, se eleva la presión de vapor del combustible y algunos hidrocarburos altamente reactivos escapan a la atmósfera, produciendo más ozono que la gasolina. "Si el vehículo de metanol es bueno, debería imponerse por ley su uso", dice Clarence M. Ditlow, director del Centro de Seguridad Automovilística.

Otro punto complicado es de dónde saldrá el metanol. Fabricarlo a partir del carbón o la biomasa cuesta casi el doble que obtenerlo del gas natural. Aunque los Estados Unidos tienen grandes reservas de gas natural, hay fuentes más baratas de tal gas en varias naciones en vías de desarrollo. Aun cuando el metanol no recortara las importaciones netas de combustibles en los Estados Unidos, dicen los expertos, sí podría reducir la vulnerabilidad del país ante los grandes grupos de exportadores.

Paradójicamente, los críticos argumentan que se aumentaría el consumo de gasolina si se concede a las empresas que fabriquen vehículos flexibles cierta libertad a las normas de economía de combustible. Los ambientalistas afirman que la obligación de ciertos niveles de rendimiento ha ayudado a disminuir el consumo de gasolina y a rebajar la contaminación. Relajar la norma, añade Ditlow, permitirá a los fabricantes sacar coches que consuman más gasolina.

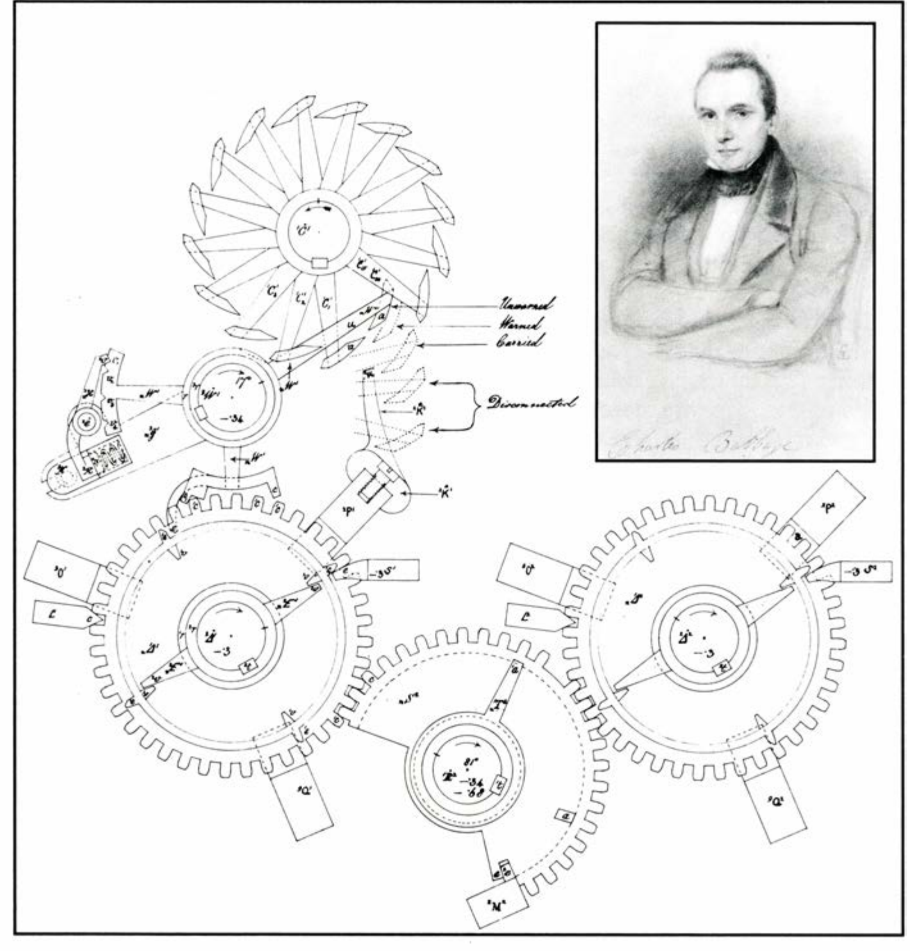
¿Una máquina diferente?

El trabajo había superado ya su presupuesto una docena de veces. Iba con 16 años de retraso. Las perspectivas de renovación de las subvenciones parecían remotas. Pese a todo, el inventor seguía teniendo confianza en su obra. "¿Quién", preguntaba, "que posea un gramo de sentido común, podría admirarse ante la precisión sin par de la Máquina Diferencial N.º 1 y dudar de que obtenga una forma simplificada de ese ingenio?"

En 1842, sin embargo, el gobierno británico se sentía menos eufórico que el inventor, Charles Babbage, y rehusó invertir un penique más en el proyecto. Profundamente decepcionado, Babbage nunca acabó la máquina; lo que no le impidió ser reconocido como el padre del ordenador. Ahora, a falta de tres años del segundo centenario del nacimiento de Babbage, la Máquina Diferencial puede gozar de otra oportunidad.

Los conservadores del Museo de la Ciencia de Londres han venido construyendo una sección del mecanismo calculador descrito por Babbage en el proyecto de su segunda Máquina Diferencial. El subsistema estará capacitado para sumar números de dos dígitos (incluso "llevando"), explica Doron D. Swade, responsable de calculadoras del Museo de la Ciencia. Confían en recibir de 200.000 a 500.000 libras esterlinas para construir la Máquina Diferencial completa.

"La versión aceptada es que Babbage no logró terminar el ingenio por culpa de las limitaciones técnicas de la



EL INVENTOR Y SU MAQUINA: Charles Babbage, en un retrato a lápiz de 1841, y uno de sus dibujos del mecanismo de adición para su Máquina Diferencial. Las ilustraciones son cortesía del Museo de la Ciencia, de Londres.

época'', dice Swade. El opina, sin embargo, que Babbage se sintió hastiado por la política, las circunstancias y su propio temperamento más que frustrado ante las dificultades técnicas de construir con preción intrincadas piezas de maquinaria.

La idea de la Máquina Diferencial nació hacia 1812, cuando Babbage comenzó a soñar con una calculadora que elaborara tablas matemáticas perfectas. En su proyecto, ruedas dentadas rotuladas con números girarían para sumar los números. El mecanismo podría ajustarse para calcular series numéricas y ecuaciones polinómicas; el operador se limitaría a girar una manivela para obtener los resultados.

Tras preparar un modelo de demostración, Babbage ofreció construir una máquina grande para el gobierno británico que calcularía tablas de navegación. El proyecto no iba a durar más de tres años y costaría unos miles de libras. El gobierno contribuyó con las primeras 1500 libras.

Hacia mediados del decenio de 1830, Babbage se había enfrascado en el proyecto de una máquina más complicada, la Máquina Analítica, que concibió se programaría mediante tarjetas perforadas. Este aparato tampoco se construyó, pues Babbage lo dejó para esbozar la segunda Máquina Diferencial. Tras haber invertido 17.000 libras, los funcionarios del gobierno se convencieron de que el éxito del inventor era, en el mejor de los casos, ''problemático'', y —en una resolución que fue aplaudida en su época— decidieron abandonar el proyecto.

No será fácil la venganza de Babbage. Aun cuando legó un montón de dibujos minuciosos de la segunda Máquina Diferencial, descuidó incluir las dimensiones, tolerancias y materiales de las piezas, entre otros detalles. (Swade espera que la máquina, una vez terminada, mida tres metros de longitud, 1,80 de altura y un metro de ancho, y conste de varios miles de piezas.) Swade cree también que la simulación de piezas por ordenador ahorrará tiempo y dinero; los conservadores tratarán, sin embargo, de seguir fieles a las técnicas de construcción que Babbage tenía a su disposición.

''Tenemos muy pocas dudas de que funcionará'', afirma Swade, haciéndose eco del entusiasmo de Babbage. Espera que la máquina se termine a tiempo para la celebración del nacimiento de Babbage el 26 de diciembre de 1991, en el supuesto que el museo reciba suficiente dinero.

Electrificación en las tormentas

Aunque se sabe, desde hace dos siglos, que el rayo es una forma de electricidad, los procesos microfísicos responsables de la formación de cargas en las nubes continúan siendo objeto de debate

Earle R. Williams

El relámpago es, de los fenómenos naturales, uno de los más espectaculares y comunes. En los dos siglos transcurridos desde que Benjamín Franklin demostró que el rayo era una descarga eléctrica gigantesca, relámpagos, rayos y tormentas han sido objeto de numerosas investigaciones científicas. Sin embargo, pese a la avalancha de nuevos equipos y técnicas de trabajo, los orígenes exactos del relámpago, del rayo y del mecanismo mediante el cual se electrifican las nubes continúan mostrándose esquivos.

La dificultad de tratar el problema reside en la propia física del relámpago y las tormentas, que abarca una escala de 15 órdenes de magnitud. En un extremo están los fenómenos atómicos que inician la electrificación de la nube tormentosa y se producen a escalas de 10^{-13} kilómetros; en el otro extremo, el movimiento del aire de la nube tormentosa entera, que completa el proceso de carga y ocurre a escalas de decenas o centenas de kilómetros. En cada una de las escalas, se encierran importantes procesos físicos todavía por conocer.

El propio Franklin, tal vez sin saberlo, acotó una de las dificultades básicas. En 1752, observó que "las nubes de una turbonada tormentosa se hallan, por lo común, en un estado negativo de electrificación, pero algunas veces se encuentran en estado positivo". Sólo recientemente se ha despejado la ambigüedad de si resultaba de observaciones incorrectas o era algo inherente a la naturaleza. No obstante, desde que Franklin escribió esas palabras, se ha aceptado que el relámpago es el paso de carga eléctrica, positiva o negativa, de una región de la nube a otra, y el rayo el tránsito equivalente de nube a tierra. Para que ocurra ese paso de cargas, la nube debe hallarse electrificada, es decir, las cargas eléctricas positivas deben estar separadas de las negativas. ¿De qué manera se produce la separación de cargas?

Como ya se verá, sólo podemos dar una respuesta parcial a esta pregunta. En los objetos de manejo ordinario, piénsese en una taza de café o un teléfono, hay igual número de cargas positivas que negativas; además, estas cargas se reparten uniformemente por el objeto, que por ello se le califica de eléctricamente neutro, o sin carga. Muchos procesos microfísicos, sin embargo, pueden provocar que las cargas se separen; entonces, aunque el objeto sigue siendo neutro considerado en su integridad, una región poseerá más cargas positivas, o negativas, que la otra. De ese objeto decimos que está cargado, o electrificado. La separación de cargas se mide en volt; cuanto mayor es la separación, mayor es el voltaje. Cuando paseamos por una habitación, ésta, tomada en su integridad, permanece neutra, pero la acción de nuestros zapatos sobre la alfombra puede cargarla con una polaridad y cargar nuestros zapatos y cuerpo con la opuesta. Lo que puede conducir a una diferencia de potencial de 100.000 volt en unos centímetros de distancia; el fenómeno se torna evidente cuando asimos el pomo de la puerta.

Un rayo típico representa una diferencia de potencial de varios cientos de millones de volt, y puede transferir 10

EARLE R. WILLIAMS es profesor de meteorología en el departamento de ciencias geológicas, atmosféricas y planetarias del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se licenció en física por el Swarthmore College en 1974 y se doctoró en geofísica por el MIT en 1981. Su interés en los rayos proviene de un verano en el laboratorio nacional de Brookhaven, donde observó chispas eléctricas en terminales de alta tensión que, si bien constituían una grave molestia para los físicos nucleares, resultaron lo suficientemente espectaculares para orientar su carrera hacia la física de las tormentas.



1. DESCARGA DE UN RAYO sobre la ciudad norteamericana de Seattle, el 31 de julio de 1984, durante una tormenta de extraordinaria intensidad. Propio del rayo es cortocircuitar una diferencia de potencial de varios cientos de millones de volt; el meteoro transporta la carga de unos 10^{20} electrones en una fracción de segundo y da una corriente máxima de hasta 10 kiloampère. Una tormenta moderada genera cientos de megawatt de potencia eléctrica: la producida por una pequeña central nuclear.

o más coulomb de carga al suelo; esa es la carga transportada por unos 10^{20} electrones. El paso de una carga de un coulomb en un segundo constituye, por definición, la intensidad de corriente eléctrica de un ampère. Un rayo porta, pues, una corriente de mucho más de 10 ampère, ya que su duración es muy inferior a un segundo. Las nubes tormentosas de tamaño modesto producen unos cuantos rayos por minuto y una potencia de algunos cientos de megawatt, es decir, la de una central nuclear pequeña. La principal tarea de los físicos dedicados al estudio de las tormentas consiste en descubrir la distribución correcta de cargas y el mecanismo físico subyacente a tales voltajes y potencias. La historia nos recuerda que las investigaciones se han centrado en la estructura eléctrica de las nubes.

Después de la observación de Franklin, resultaba natural admitir que la distribución de cargas en una nube tormentosa obedecía al modelo más sencillo imaginable: cargas positivas en una región de la nube y cargas negativas en otra. Se trata de una estructura en dipolo. Para explicar la supuesta estructura dipolar de las nubes tormentosas, los investigadores han invocado dos modelos muy diferentes: la hipótesis de la precipitación y la hipótesis de la convección.

Precipitación frente a convección

La hipótesis de la precipitación, propuesta por los físicos alemanes Julius Elster y Hans F. Geitel, en 1885, se basa en un fenómeno que se observa en el funcionamiento de cualquier aspersor de jardín: las gotas de agua grandes se apartan del chorro cayendo rápidamente, mientras que la neblina de pequeñas gotitas permanece suspendida en el aire y es arrastrada por el viento. De manera análoga, la hipótesis de la precipitación supone que las gotas de lluvia, el pedrisco y las partículas de granizo (bolitas de hielo cuyo tamaño varía desde milímetros hasta centímetros de diámetro) en una tormenta son atraídas hacia abajo por la gravedad a través del aire, dejando atrás gotas de agua menores y cristales de hielo que quedan en suspensión. Las colisiones entre las grandes partículas de precipitación y la neblina de gotitas de agua y cristales de hielo, al parecer, cargan negativamente las partículas de precipitación (de la misma manera que las cargas pasan de la alfombra a los zapatos); por conservación de la carga total, la neblina se carga positivamente. De aquí que, si las partículas de precipitación se cargan negativamente, la parte más baja de la nube irá acumulando carga negativa y la parte superior carga positiva [*véase la figura 2*]. Una estructura de carga en que la región positiva está en la parte más alta se llama dipolo positivo.

La hipótesis de la convección, formulada por Gaston Grenet, de la Universidad de París, en 1947, y luego por Bernard Vonnegut, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, en



1953, encierra algo más de complejidad. El término de comparación es aquí el generador de Van de Graaff. En ese ingenio, se rocía una carga eléctrica positiva o negativa sobre una cinta móvil de goma, que transporta las cargas, o iones, a un terminal de alta tensión. El modelo de convección supone que las cargas eléctricas de la nube proceden, inicialmente, de dos fuentes externas: los rayos cósmicos y un campo eléctrico. Los rayos cósmicos inciden sobre las moléculas del aire por encima de la nube y las ionizan (es decir, separan las cargas positivas y las negativas). La segunda fuente es el intenso campo eléctrico que ciñe objetos puntiagudos de la superficie de la tierra; dicho campo produce una "descarga en corona" de iones positivos. El aire caliente los transporta hacia arriba; asciende éste por convección y actúa como la cinta del generador de Van de Graaff. Una vez han alcanzado las regiones superiores de la nube, esos iones positivos atraen a los negativos que los rayos cósmicos habían formado encima de la nube. Los iones negativos penetran en la nube y se unen rápidamente a gotitas de agua o cristales de hielo, creando una "capa pantalla" cargada negativamente. Por hipótesis, las corrientes de aire descendentes en la periferia de la nube transportan entonces las partículas cargadas negativamente de la capa protectora hacia abajo; el resultado vuelve a ser la formación de una estructura de dipolo positivo.

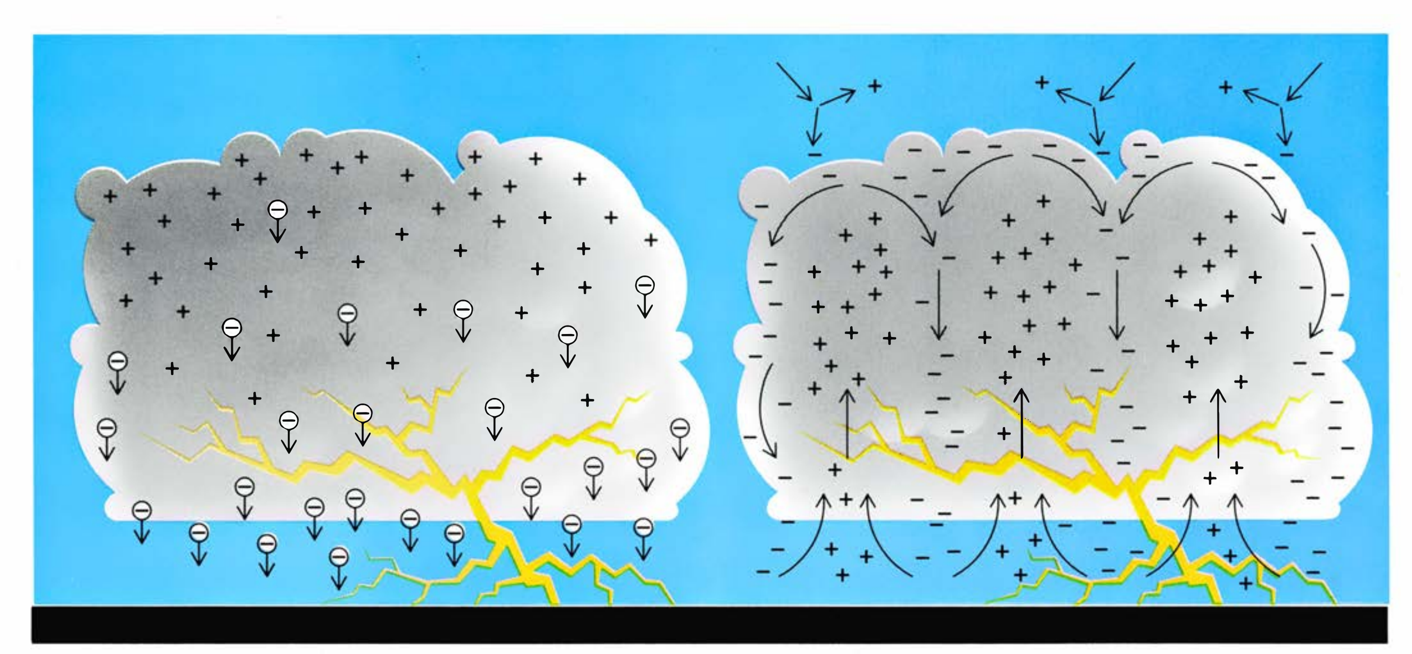
Aunque en todas las nubes que producen relámpagos o rayos se observan precipitación y convección (fenómenos inseparables en nubes de gran desarrollo), puede verse que la hipótesis elemental de la precipitación no requiere la convección, ni la hipótesis de la convección exige la precipitación. La notable diferencia entre los dos modelos ha guiado a los investigadores en su camino hacia la comprensión de los respectivos papeles de la precipitación y la convección en la electrificación de las nubes.

Estos modelos se desarrollaron para explicar la estructura dipolar de las nubes tormentosas. Pero, como ya se mencionó, la primera observación de Franklin en 1752 sugería una ambigüedad: ¿era positiva o negativa la carga de la parte alta? Cuestión que provocó, pronto, la controversia entre C.T.R. Wilson y George C. Simpson sobre la estructura de la distribución de cargas en una nube tormentosa. El debate trajo a la palestra algunas de las dificultades para obtener datos representativos en las tormentas; de ahí su interés.

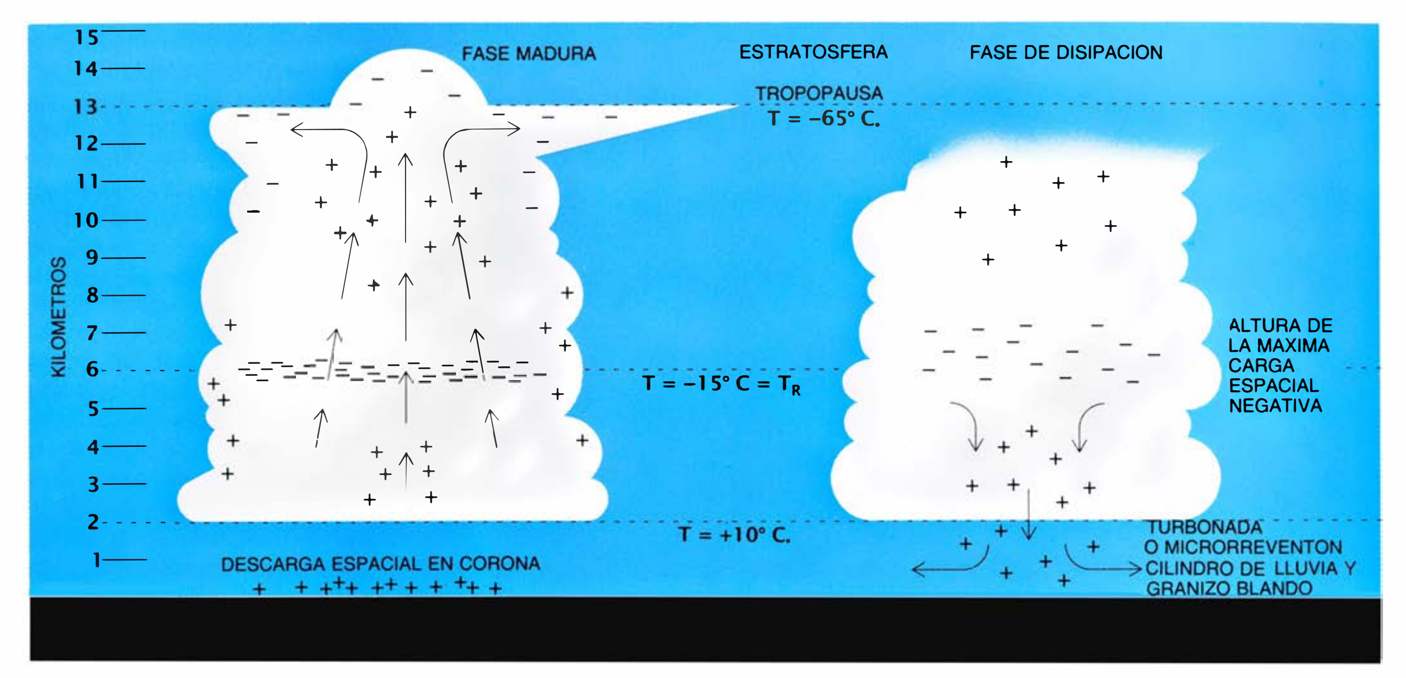
En el decenio que empezó en 1920 Wilson, autor ya de la cámara de niebla que lleva su nombre, tras realizar observaciones de numerosas tormentas a cierta distancia, llegó a la conclusión de que la estructura básica de una nube tormentosa era la de un dipolo positivo. Hacia la misma época, Simpson, midiendo la carga de la lluvia producida por nubes tormentosas, llegó, sin embargo, a la conclusión opuesta: que la región inferior de una nube tormentosa estaba cargada positivamente y la superior lo estaba negativamente, formando, pues, un dipolo negativo.

¿Dipolo positivo o negativo?

Sólo en estos últimos veinte años han podido los investigadores explicar esos resultados, incompatibles a primera vista. Con la ventaja de la perspectiva, se puede decir que la razón más importante para la persistencia de tal discrepancia obedece a que rara vez se mide la carga en una nube tormentosa; antes bien, se infiere de las mediciones del campo eléctrico de la nube. Un campo eléctrico que rodee a un cuerpo cargado se asemeja, casi en todo, al campo gravitatorio que rodea a un cuerpo de gran masa. Ambos campos hacen que otros objetos situados en el interior de los mismos se muevan; la gravedad atrae a los objetos con masa; el campo eléctrico atrae o repele los objetos cargados. La fuerza gravitatoria o eléctrica que actúa sobre tales "partículas de prueba" remite con el cuadrado de la distancia entre ésta y el cuerpo central. Ambos campos están, por tanto, caracterizados por una in-



2. DOS MODELOS para explicar la estructura eléctrica de las nubes tormentosas. El modelo de la precipitación (*izquierda*) sugiere que la gravedad atrae a las gotas grandes, piedras de granizo y partículas de hielo de milímetros de diámetro, llamadas granizo blando; pasan a través de gotículas de agua y cristales de hielo, que permanecen en suspensión. Se cree que las colisiones entre las partículas que caen y la bruma suspendida cargan positivamente la neblina y negativamente las partículas más pesadas. Cuando éstas caen, la parte inferior de la nube se carga negativamente y la parte superior positivamente, formando una estructura en dipolo positivo. La hipótesis de la convección (*arriba*) propone que las corrientes ascendentes de aire cálido transportan cargas positivas desprendidas de la superficie de la Tierra hasta la cima de la nube. Las cargas negativas, producidas por los rayos cósmicos por encima de la nube, se ven atraídas hacia la superficie de la nube por las cargas positivas que hay en ella. Las cargas negativas se asocian a las partículas de la nube y tejen una "capa apantalladora" negativa. Se supone que las corrientes descendentes transportan las cargas negativas hacia abajo; este proceso desemboca en la formación de un dipolo positivo. Adviértase que el modelo convectivo no apela, bajo ningún concepto, a la precipitación, ni el modelo de la precipitación precisa para nada de la convección.



3. ESTRUCTURA REAL DE UNA NUBE TORMENTOSA. No es dipolar, sino tripolar, con una región principal negativamente cargada y comprendida entre dos regiones cargadas positivamente. En una nube tormentosa desarrollada (madura) (*izquierda*), la región principal de carga negativa se halla a unos seis kilómetros de altura y a unos -15 grados Celsius de temperatura. Posee un espesor de unos cientos de metros, que le confieren una apariencia de torta. La región superior positiva se extiende frecuentemente hasta la tropopausa, a unos 13 kilómetros de altura. En la cima misma de la nube hay una delgada capa de cargas negativas, la capa apantalladora; su origen puede deberse a los rayos cósmicos, que ionizan las moléculas de aire. En la parte inferior de la nube hay una segunda región de carga positiva, menor que la primera. En una nube tormentosa madura dominan las corrientes de aire ascendentes (*flechas*); en una nube tormentosa en disipación (*derecha*), sin embargo, la región inferior de carga positiva precipita con fuertes corrientes descendentes. El modelo de la precipitación, muy sencillo, no explica la estructura tripolar de las nubes tormentosas. La hipótesis de convección lo hace suponiendo que la región positiva inferior se debe a la llamada descarga en corona, que tiene lugar en los objetos puntiagudos del suelo. Hay, sin embargo, indicaciones recientes según las cuales la explicación correcta de la estructura tripolar estribaría en la microfísica del intercambio de cargas entre partículas de granizo blando y cristales de hielo.

tensidad (determinada por la distancia al cuerpo que atrae o repele) y una dirección (atractiva o repulsiva). Los campos definidos por una intensidad y una dirección se llaman campos vectoriales.

Cuando hay más de un cuerpo cargado, el campo eléctrico puede resultar muy complicado. Además, cualquier número de configuraciones de carga puede producir la misma intensidad y dirección del campo en un punto dado. Así, pues, una medida única del campo eléctrico no puede determinar unívocamente la distribución de cargas. Se necesitan muchas medidas; en principio, debería medirse realmente el campo eléctrico en todas partes para deducir la verdadera distribución de cargas. Wilson y Simpson, ambos, realizaron mediciones desde un solo punto, lo que no basta para inferir correctamente la distribución de cargas.

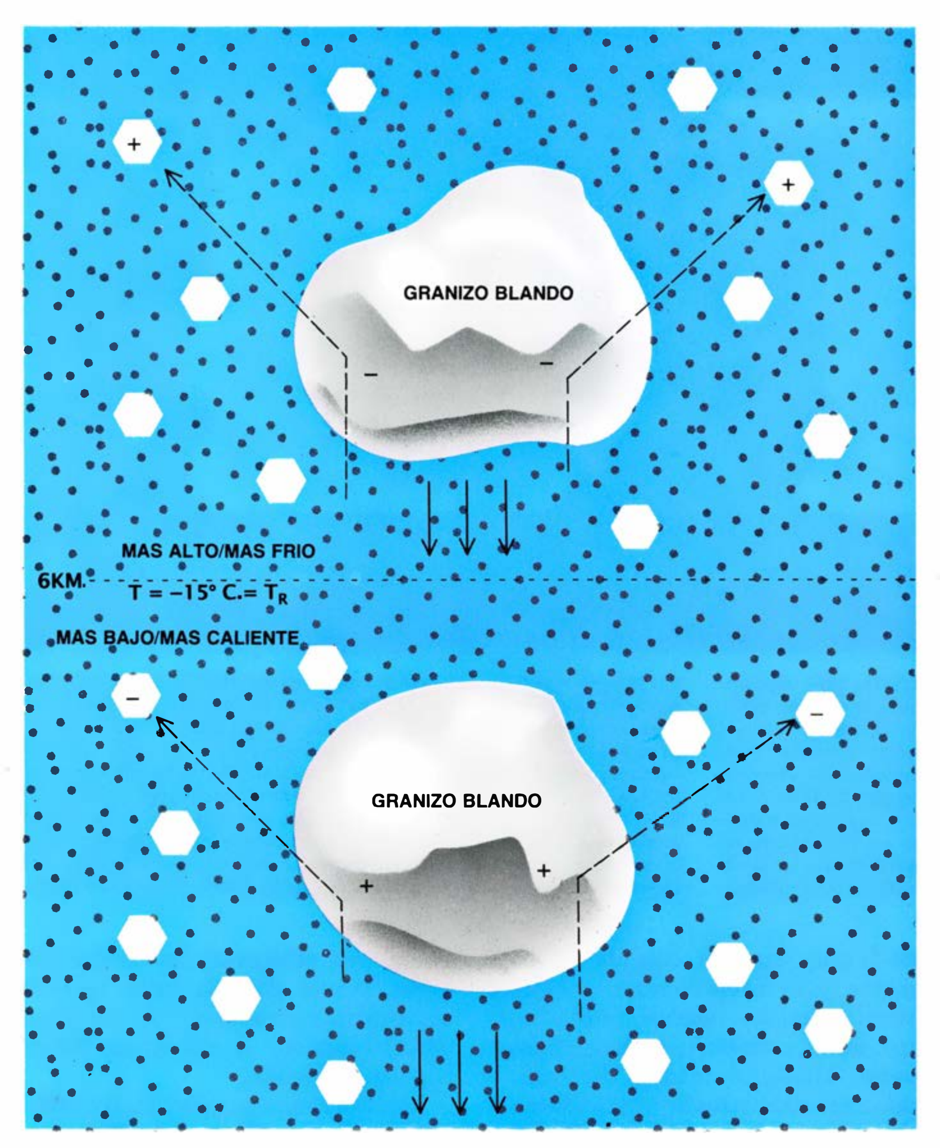
Desde la controversia Wilson-Simpson, y transcurridos ya más de cincuenta años de observaciones, se ha establecido que la estructura básica de las nubes tormentosas no es dipolar, sino tripolar: hay una región principal de carga negativa en el centro, con una región de carga positiva encima de ella y una segunda región, menor, de carga positiva debajo de aquélla [*véase la figura 3*]. La característica más notable de la capa principal, cargada negativamente, es su forma de torta: su espesor vertical, aunque inferior a un kilómetro, puede extenderse horizontalmente varios kilómetros o más. Se halla a unos seis kilómetros de altura, donde la temperatura se aproxima a -15 grados Celsius. Bajo las condiciones allí dominantes, las tres fases del agua —hielo, líquido y vapor— pueden coexistir. Los campos eléctricos más intensos de la nube tormentosa se encuentran en las fronteras superior e inferior de la capa principal de carga negativa.

La región superior de carga positiva es más difusa que la capa negativa; puede prolongarse verticalmente, varios kilómetros, incluso hasta la propia cima de la nube. Por contra, la región inferior de carga positiva es tan pequeña que el campo eléctrico de la superficie terrestre se halla frecuentemente determinado por la carga negativa principal. Se observa otra característica notable en muchas nubes: una capa de carga negativa, de unos 100 metros de espesor, por encima de la región positiva superior. Esta capa puede proceder de iones negativos, producidos encima y fuera de la nube, capturados después por las gotitas de agua o las partículas de hielo de la nube; se trata de la capa apantalladora predicha por la hipótesis de la convección. Sin embargo, con independencia de sus orígenes, la capa pantalla parece ser una característica secundaria que no altera apreciablemente la estructura básica tripolar de la nube.

Esta estructura tripolar ayuda a comprender los resultados de Wilson y Simpson. Wilson realizó sus observaciones desde una distancia considerable; el efecto eléctrico de la pequeña región positiva de la base de la nube quedaba anulado por la región negativa principal. Por consiguiente, él sólo vio la carga positiva superior y una carga negativa debajo de ella, es decir, un dipolo positivo. Simpson, por su parte, realizó las observaciones debajo de la nube; sus instrumentos detectaron la región positiva inferior por encima mismo del investigador. Como la carga negativa central, más arriba, apantallaba la región positiva superior, Simpson concluyó que la carga negativa estaba en la parte alta y, de ahí, que la estructura de la nube fuera la de un dipolo negativo.

Microfísica

La estructura tripolar de las nubes tormentosas exige algunas modificaciones del modelo de precipitación, muy ingenuo, que sólo puede explicar un dipolo único; dejemos de lado la ausen-



4. **MICROFISICA DE LA SEPARACION DE CARGAS: debe dar cuenta de los choques entre partículas de granizo blando y cristales de hielo. Las partículas de granizo blando, pesadas, caen a través de una suspensión de cristales de hielo más pequeños (*hexágonos*) y gotitas de agua sobreenfriadas (*puntos*). Los experimentos de laboratorio muestran que, cuando la temperatura está por debajo de un valor crítico, llamado temperatura de inversión de carga, T_R, las partículas de granizo blando que caen adquieren carga negativa en los choques con los cristales de hielo. A temperatura por encima de T_R, adquieren carga positiva. Se cree que el valor de T_R es de unos -15 grados Celsius, que es la temperatura de la principal región negativa que se encuentra en una nube tormentosa; así, el granizo blando adquiere carga positiva cuando cae, por debajo de esta altura, a temperaturas mayores. Hay pruebas en el sentido de que esas partículas de granizo blando, cargadas positivamente, formarían la región positiva inferior del tripolo de la nube tormentosa.**

cia de explicación de la microfísica del transporte de carga. Por otra parte, podría parecer que el modelo de convección conducía, de forma más natural, a una estructura tripolar porque admitía que la descarga en corona de los objetos puntiagudos en la superficie de la Tierra producía un flujo de cargas positivas hacia la base de la nube. Creíase que esta corriente explicaría quizá la región inferior, cargada positivamente, del tripolo. Mediciones recientes del tamaño de esta corriente indican, no obstante, que puede ser un orden de magnitud demasiado pequeña para dar cuenta de la velocidad de carga de la nube. En parte por esta razón, el modelo de convección ha perdido crédito. Habrá que probar, pues, con modificar el modelo de precipitación.

Se han propuesto varios arreglos del mismo que permitan explicar la región positiva inferior y dar razón del siguiente fenómeno: la lluvia suele llevar carga positiva. Simpson acometió un primer intento para explicar esas observaciones. Por estudios realizados en cascadas, se sabe que las gotas mayores adquieren selectivamente una carga positiva al romperse. (Quien tenga la oportunidad, puede comprobarlo llevando consigo un microamperímetro a bordo del *Maid of the Mist*, que se acerca a las cataratas del Niágara.) Simpson propuso que las gotitas de agua que caían de una nube tormentosa se fragmentaban igualmente cerca de la base de la nube y explicaban así la región inferior positiva. Pero las mediciones realizadas bajo la región principal de carga negativa de las nubes tormentosas muestran que las partículas de precipitación transportan cargas que son notablemente mayores que las producidas en el proceso de fragmentación en una cascada; esto plantea graves objeciones contra la plausibilidad de la fragmentación como razón de la carga positiva inferior del tripolo. Sabemos, además, que la mayoría de las partículas positivamente cargadas que caen debajo de la región principal de carga negativa no son gotitas, sino hielo.

Hielo y granizo

El hielo desempeña un importante papel en las otras explicaciones de la estructura tripolar de las nubes tormentosas. Estudios de laboratorio llevados a cabo en los años cuarenta mostraron que las partículas de hielo adquirían una fuerte carga positiva al fundirse. A esa observación se apela todavía para justificar la región inferior positiva de la nube. Aunque la fusión puede explicar la existencia de partículas positivamente cargadas a alturas inferiores a 4000 metros, donde el hielo comienza a fundirse en las tormentas de latitudes medias, no puede, sin embargo, justificar su existencia a mayores altitudes, donde también se observan partículas cargadas positivamente.

No parece que la fusión del hielo cause la estructura tripolar observada. Hay, sin embargo, un considerable cúmulo de pruebas en favor de la intervención de las colisiones entre los cristales de hielo y las partículas de granizo blando. A lo largo de los últimos veinte años, los estudios de laboratorio realizados por muchos investigadores, especialmente Stephen E. Reynolds, Marx Brook y sus colaboradores, del Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México, Tsutomu Takahashi, de la Universidad de Hawai en Manoa, y Clive P. R. Saunders, John Latham y Anthony J. Illingworth, en la Universidad Victoria, han mostrado que, cuando las partículas de granizo blando chocan con los cristales de hielo, la polaridad de la carga que pasa a las partículas depende notablemente de la temperatura. Por debajo de una temperatura crítica, llamada temperatura

de inversión de carga, las partículas se cargan negativamente; a temperaturas más altas (correspondiendo a menores alturas en la nube tormentosa), se cargan positivamente [*véase la figura 4*]. El valor exacto de la temperatura de inversión de carga es todavía objeto de discusión, pero la mayoría está de acuerdo en que su valor se encuentra entre −20 y −10 grados Celsius.

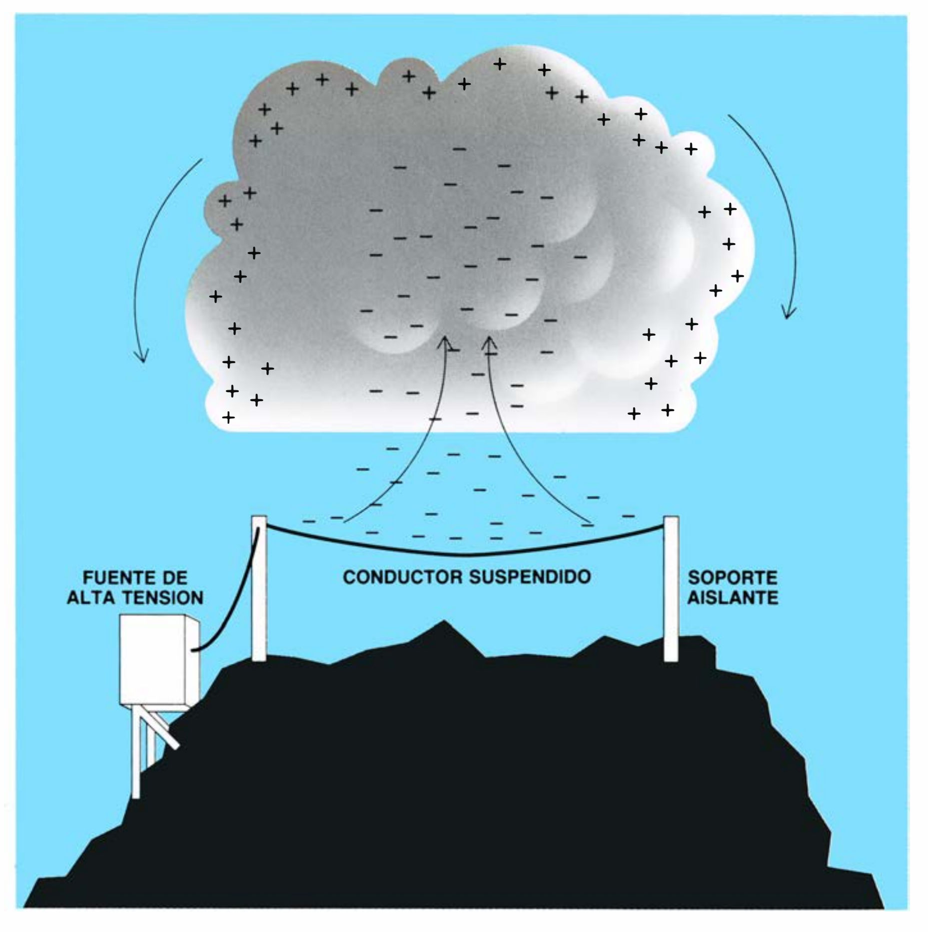
Las observaciones de nubes de tormenta mediante varios métodos muestran que la capa principal cargada negativamente se halla a una altura donde la temperatura es de unos −15 grados. La hipótesis de la inversión de carga explica, pues, por qué las cargas negativas se encuentran con menos frecuencia por debajo de esta altura: las partículas de granizo blando se cargan positivamente al caer a través de los cristales de hielo suspendidos y colisionar con ellos. Estas cargas positivas que caen forman la región inferior positiva del tripolo. Además, la cantidad de carga aportada por cada colisión en el laboratorio es de magnitud suficiente para explicar la carga transportada por los rayos en las nubes de modesta actividad eléctrica. Haber establecido el concepto de temperatura de inversión de carga y un valor de ésta concordante, tanto con los experimentos de laboratorio como con las observaciones de nubes tormentosas, debe considerarse el principal avance reciente en electricidad de tormentas.

Al mismo tiempo, no sabemos nada apenas de los procesos microfísicos subyacentes bajo la cesión sistemática de carga de una polaridad a las partículas de granizo blando, ni de la temperatura de inversión. El mecanismo físico podría no ser muy distinto del que provoca que los zapatos se carguen cuando caminamos sobre una alfombra, o lo haga la varilla de vidrio que frotamos con un trapo de lana. Aunque se trata de fenómenos conocidos desde la antigüedad, la microfísica fundamental que les da soporte constituye todavía un problema dejado de lado sin resolver. La falta de una descripción microfísica de la electrificación estática es el vacío más grave que queda en nuestro conocimiento sobre la electricidad de las tormentas.

Convección

Aunque el modelo de convección puede ser inadecuado para dar cuenta de la magnitud de la región positiva inferior, es bien sabido que las tormentas son regiones de vigorosas corrientes verticales ascendentes y descendentes; la convección está indiscutiblemente presente. Se ha observado también que las máximas tasas de producción de rayos se hallan asociadas al movimiento ascendente de granizo blando y granizo por encima de la región principal de carga negativa. Este cuadro contradice la hipótesis de la precipitación, muy ingenua, en la que sólo las partículas de granizo blando que se movían hacia abajo causaban la electrificación. El movimiento relativo entre los cristales de hielo y el granizo blando es la razón probable de la separación de cargas a gran escala. Se impone una condición importante: que los cristales de hielo asciendan de la Tierra a una velocidad mayor que las partículas de granizo blando; lo que resulta ser equivalente al granizo blando en caída. Además, las ascendencias vigorosas no sólo son coherentes con la electrificación, sino que le son esenciales: la ascendencia mantiene la provisión de gotas de agua subenfriadas por encima de la altura de inversión de carga. Esas gotitas proporcionan el material necesario para el crecimiento de las partículas de granizo blando que se precisan para la electrificación; además, de acuerdo con los experimentos de laboratorio descritos arriba, no hay paso apreciable de cargas entre las partículas de granizo blando y los cristales de hielo si están ausentes las gotas.

A lo largo de los últimos diez años, las corrientes descendentes en las tormentas se han convertido en preocupación creciente para la seguridad aeronáutica. Se cree que las descendencias desacostumbradamente intensas que Tetsuya T. Fujita, de la Universidad de Chicago, llamó microrreventones, han causado importantes accidentes de aviones comerciales. Recientes estudios de tormentas estacionarias han puesto de manifiesto que esas descendencias se producen entre cinco y diez minutos después del momento de ascendencia máxima y de la máxima actividad eléctrica intranubosa; las co-



5. EXPERIMENTOS de Charles B. Moore y Bernard Vonnegut para someter a prueba la hipótesis de la convección. El aire situado bajo un cúmulo se carga positivamente mediante un conductor conectado a un generador de alta tensión. Las mediciones tomadas desde un avión muestran que la convección transporta las cargas hacia arriba, a través de la nube. Al cambiar la polaridad de la fuente, la polaridad de la nube cambia. Los experimentos indican que la convección transporta las cargas hacia arriba; el campo producido, sin embargo, es unas mil veces menor que el necesario para generar chispas en nubes eléctricamente activas; está por ver, sin embargo, la trascendencia de esos experimentos en relación con las nubes tormentosas.



6. RELAMPAGOS O RAYOS INTERNOS de las nubes. Mucho más frecuentes que las descargas de las nubes a tierra, o rayos propiamente dichos, se ven bastante menos porque las nubes dispersan intensamente la luz del espectro visible. El radar, los radiolocalizadores y los micrófonos, que "ven" a través de las nubes, prestan ahora un servicio auxiliar a los investigadores que estudian las chispas del interior de la nube.



7. RIZAR EL RIZO para mostrar que las trayectorias de las chispas no siguen direcciones sencillas. La bibliografía especializada nos habla de ideas en conflicto, según algunas de las cuales las trayectorias son aleatorias, mientras que otras proponen que están determinadas por la configuración del campo eléctrico o por la distribución de la carga eléctrica en el espacio. Esta aplicación puede explicar muchas observaciones.

rrientes descendentes están también asociadas a la intensa precipitación que se produce cuando se agotan las corrientes ascendentes.

Los resultados de las mediciones muestran también que, en el suelo, el campo eléctrico se invierte en este momento; tuerce su dirección hacia arriba por otra hacia abajo. En la precipitación se encuentra carga positiva, lo que sugiere que se transporta, hasta el suelo, la región inferior de carga positiva de la nube durante la fase de microrreventón. La frecuencia de relámpagos en el interior de la nube y las inversiones del campo eléctrico podrían servir para alertar a los controladores del tráfico aéreo sobre condiciones peligrosas en superficie.

Esas corrientes convectivas, intensas, caracterizan a las tormentas; podría pensarse, pues, en el modelo convectivo para explicar algunos aspectos de la electrificación de las nubes. Lo dijimos más arriba: sí predice la capa apantalladora. Por cuyo motivo, varios investigadores, particularmente Charles B. Moore, del Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México, y Vonnegut han continuado sometiéndolo a prueba. En sus experimentos, se cargaba el aire bajo un cúmulo de buen tiempo mediante un alambre conectado a un terminal de alta tensión [*véase la figura 5*]. Las observaciones eléctricas realizadas desde un avión demostraban que la carga liberada por la descarga en corona del alambre se transportaba hacia arriba, a través de la nube, merced a los movimientos convectivos del aire. Más aún, cuando se liberaba carga positiva, la parte superior de la nube quedaba cargada positivamente y, la inferior, negativamente; formaban un dipolo positivo. Ahora bien, cuando la polaridad de la carga desprendida por la fuente de alimentación pasaba a ser negativa, la nube adquiría una estructura de dipolo negativo. Estos resultados indicaban que la convección transportaba la carga a la parte superior de las nubes.

La carga interior de las nubes producida por estos experimentos era, sin embargo, unas cien veces menor que las registradas en tormentas activas; el campo eléctrico resultaba unas mil veces menor que el necesario para iniciar los relámpagos. Por consiguiente, los experimentos no demostraron directamente el papel de la convección en tormentas precipitantes y eléctricamente activas; no se puede, pues, afirmar que los experimentos corroboren la hipótesis de la convección.

Se han realizado, recientemente, ex-

perimentos similares bajo nubes mayores, con precipitación. La carga negativa liberada artificialmente ha dado por resultado, en algunos casos, una carga negativa dominante encima y una carga positiva abajo. Eso concuerda con los resultados previos y con la hipótesis de la convección. La interpretación de los resultados no carece, empero, de ambigüedad: como se está produciendo precipitación, la carga positiva inferior puede ser también el resultado del proceso microfísico, ya descrito, de paso de carga entre hielo y granizo blando.

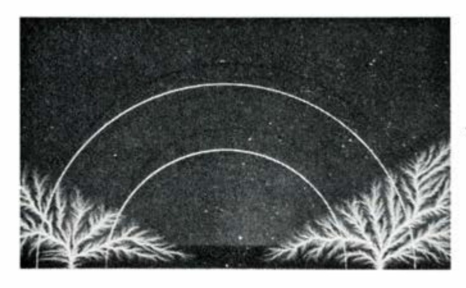
Hay otra observación referente a la hipótesis de la convección que es menos ambivalente: el hecho de que la región principal cargada negativamente esté a una altura y temperatura aproximadamente constantes. En el modelo de convección, las corrientes de aire transportan las partículas cargadas negativamente desde la capa apantalladora hacia varios kilómetros abajo. Es difícil comprender entonces por qué la carga negativa debe concentrarse sobre todo en una región en forma de torta, cuyo espesor sea de sólo cientos de metros. Según se expuso arriba, esta observación se explica mejor con el proceso microfísico de inversión de carga y es, tal vez, el argumento principal contra el modelo de convección.

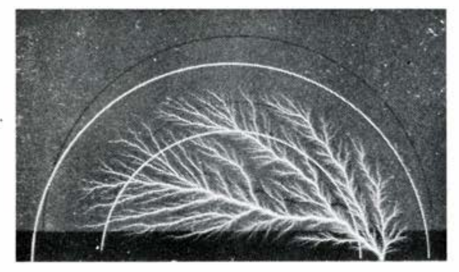
Para resumir la situación de los modelos de precipitación y convección, el primero puede explicar más aspectos de la electrificación de las nubes que el modelo de convección, pero lo hace ignorando uno de los rasgos prominentes de las tormentas: la convección. En el futuro se combinarán, presumiblemente, los mejores aspectos de ambos modelos en una teoría general.

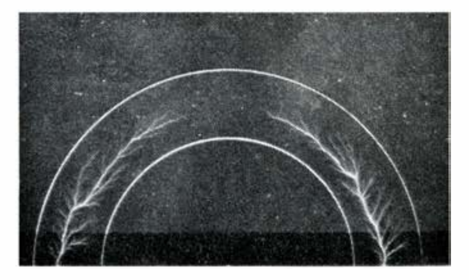
Una vez que la nube tormentosa se ha cargado hasta el punto en que el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica local de la atmósfera, esto es, la capacidad de la atmósfera para mantener una separación de cargas eléctricas, el resultado es un relámpago. El campo eléctrico, en ese instante, es del orden de un millón de volt por metro; en menos de un segundo, el rayo transportará la carga correspondiente a 10^{20} electrones y proporcionará la potencia eléctrica equivalente a unos 100 millones de bombillas ordinarias. Durante esa fracción de segundo, la energía electrostática de la carga acumulada pasa a energía electromagnética (el relámpago visible así como la interferencia de radio), energía acústica (el trueno) y, finalmente, calor.

Casi todas las descargas naturales se inician dentro de la nube y progresan en forma de un árbol de dos ramos; uno invade las regiones de carga negativa y, el otro, las de carga positiva.









8. PRUEBA IVY-MIKE DE UNA BOMBA DE HIDROGENO de 10 megatones, llevada a cabo en el año 1952. Generó relámpagos durante los 10 milisegundos ulteriores a la detonación. El intenso estallido de rayos gamma originado por la explosión arranca electrones de las moléculas de aire mediante un proceso de efecto Compton; los electrones, más ligeros, se alejan rápidamente de las moléculas de aire, ahora positivas, dando lugar a una separación de cargas. La simetría hemisférica de la explosión posibilita la simulación, en el laboratorio, de la distribución de carga. Los tres experimentos que aparecen en la parte inferior se realizaron en el laboratorio de Investigación de Alta Tensión del Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde se inyectó carga eléctrica en regiones específicas de un bloque de plástico aislante. Los modelos presentan un campo eléctrico similar cerca del suelo, pero diferentes distribuciones de carga. Sólo el modelo 3 reproduce la configuración de chispas del IVY-MIKE; indica que es la distribución de carga, y no el campo, lo que determina la trayectoria de los rayos. La descarga parte del punto del suelo donde el campo eléctrico es grande y viaja hacia arriba, a través de la región de máxima carga negativa.

En el caso de una descarga de nube a tierra, la rama negativa del árbol se convierte en "guía de descenso", que transporta hacia abajo una corriente negativa de cientos de ampère. Cuando el "guía" se acerca a unos 100 metros del suelo, se inicia una chispa de retorno, que transporta hacia arriba una corriente de carga positiva de 10 kiloampère (10.000 coulomb por segundo). La chispa de retorno luminosa es lo que se aprecia a simple vista; por eso, cuando se habla de una chispa de nube a tierra, debe recordarse que el rayo viaja realmente en ambos sentidos, en ocasiones, varias docenas de veces.

Relámpagos y rayos

Los primeros estudios de los relámpagos se concentraron en las descargas de nube a tierra (rayos) porque eran las más accesibles a la observación visual y fotográfica. Resulta, sin embargo, que las descargas son mucho más frecuentes y extensas dentro de la propia nube, donde están ocultas a la vista, en virtud de la opacidad de la nube. Se ha intentado, en estudios más recientes, investigar los relámpagos internos de la nube, con la ayuda de radar, localizadores de radiofrecuencia y micrófonos. El interés se centra en los caminos que toman las descargas y su relación con la estructura de las nubes.

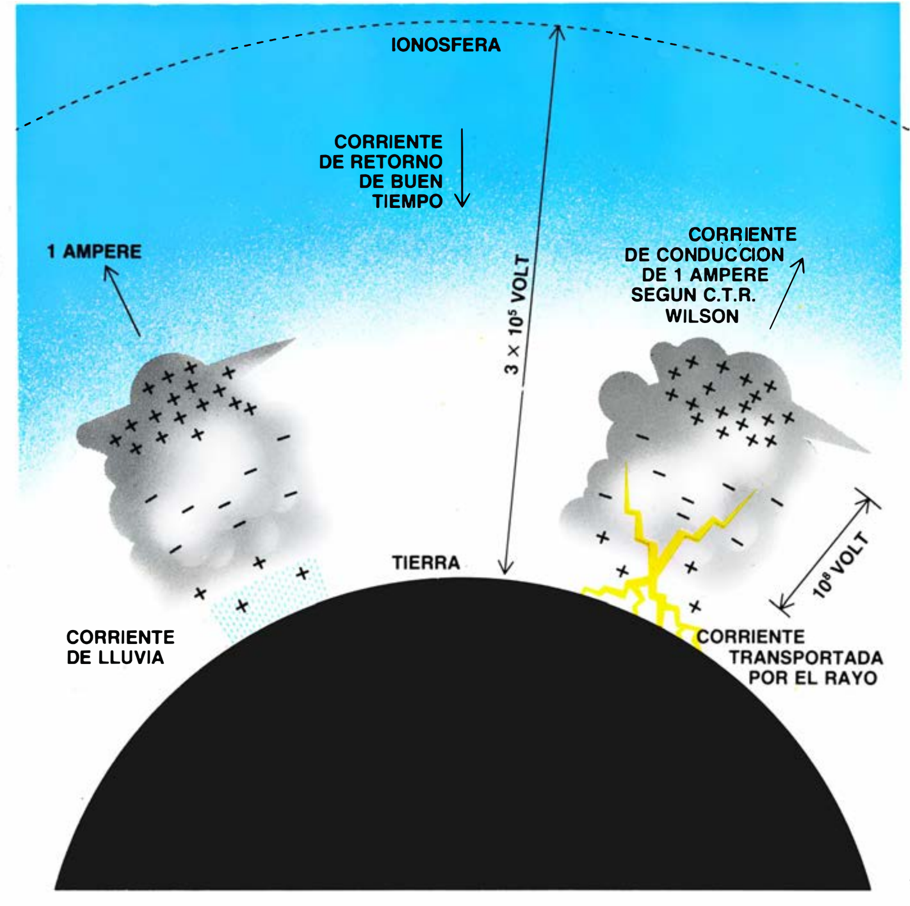
Las chispas se producen en regiones con precipitación y sin ella, dentro y fuera de las nubes; frecuentemente, sus trayectorias son, tal parece, muy caóticas; se ha dicho muchas veces que siguen caminos aleatorios. Los modelos teóricos para las trayectorias de las chispas se han centrado, de manera preferente, en el papel del campo eléctrico. Dicho de otro modo, creíase que la intensidad y dirección del campo eléctrico local determinaba la trayectoria del relámpago. Hasta hace poco, se había prestado escasa atención al papel de la propia carga. Esta da lugar a un campo. Podría, pues, pensarse que conocer una es tan bueno como conocer el otro; pero debe también tenerse en cuenta que un campo eléctrico puede producirse localmente por cualquier número de distribuciones de carga distintas. Por tanto, la posición de la carga no da automáticamente la configuración del campo local. A lo que debemos sumar una complicación adicional: la distribución de carga y el campo no son estáticos sino dinámicos; al formarse y crecer la chispa, la configuración del campo cambia radicalmente, lo que dificulta, muchísimo más, su modelación.

Las indicaciones actuales señalan que las dos ramas del "árbol" de la chispa tienden a seguir el camino de la máxima concentración de carga. En ese sentido, muchas observaciones revelan que las chispas prefieren la región principal de carga negativa.

Sin embargo, la prueba más clara de que las trayectorias de las chispas se hallan regidas por la distribución de las cargas en el espacio procede, probablemente, de los estudios del comportamiento de las chispas producidas por las explosiones de armas nucleares. Las fotografías de las pruebas de bombas H llevadas a cabo en los años cincuenta muestran que la bola de fuego está frecuentemente rodeada de rayos [*véase la figura 8*]. A diferencia del cuadro teórico de la nube tormentosa, aquí el mecanismo básico de separación de cargas se conoce bien. El flujo radial de fotones de alta energía emitido por la bola de fuego despoja de sus electrones a las moléculas de aire circundantes, en un proceso de dispersión de Compton. Los electrones cargados negativamente se concentran en una capa hemisférica centrada en el punto de la explosión, dejando una región cargada positivamente en la bola de fuego.

La simetría hemisférica de la explosión hace posible construir modelos teóricos y de laboratorio sobre la distribución de carga muy sencillos; permite, asimismo, investigar su efecto sobre la trayectoria de los rayos. Chathan M. Cooke, Kenneth A. Wright y el autor han realizado tales simulaciones en el laboratorio de Investigaciones de Alta Tensión del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se inyectan cargas distribuidas anularmente en bloques de plástico aislante, que aprisionan la carga según predice el modelo teórico. El campo eléctrico resultante adquiere suficiente intensidad para desencadenar descargas semejantes a los rayos.

Descubrimos que el rayo se producía en el punto próximo al nivel umbral (cero) de la simulación, donde el campo eléctrico se torna más intenso; el rayo asciende entonces a través de la región de máxima carga negativa. La morfología de la chispa recuerda las que aparecen en las fotografías de



9. EL CIRCUITO GLOBAL se carga mediante las tormentas, que hacen de baterías. Entre la Tierra, cargada negativamente, y la alta atmósfera, hay una diferencia de potencial casi constante de 300.000 volt. En la escala de las nubes, hay corrientes de alrededor de un ampère que salen de las cimas de las tormentas y ayudan a mantener la diferencia de potencial; esto requiere que una corriente similar vaya del suelo a la parte baja de las nubes. A gran escala, la corriente de fuga, de buen tiempo y de unos 2000 ampère, que transporta carga positiva de la alta atmósfera al suelo, eliminaría la diferencia de potencial de 300 kilovolt si las tormentas no recargasen el circuito. Se cree que las tormentas de los trópicos, que transportan grandes cantidades de carga negativa al suelo, son el agente dominante para compensar la corriente de buen tiempo.

pruebas nucleares. Se pueden, además, proyectar experimentos con distribuciones de carga predichas por otros modelos teóricos. Aunque algunos de esos otros modelos producen la misma configuración del campo eléctrico en el suelo, la distribución de carga puede aparecer enteramente distinta. Las formas de los rayos no se parecen a las de los que se observan en pruebas nucleares, lo que demuestra que es principalmente la carga lo que determina la trayectoria de la chispa.

La energía y el circuito global

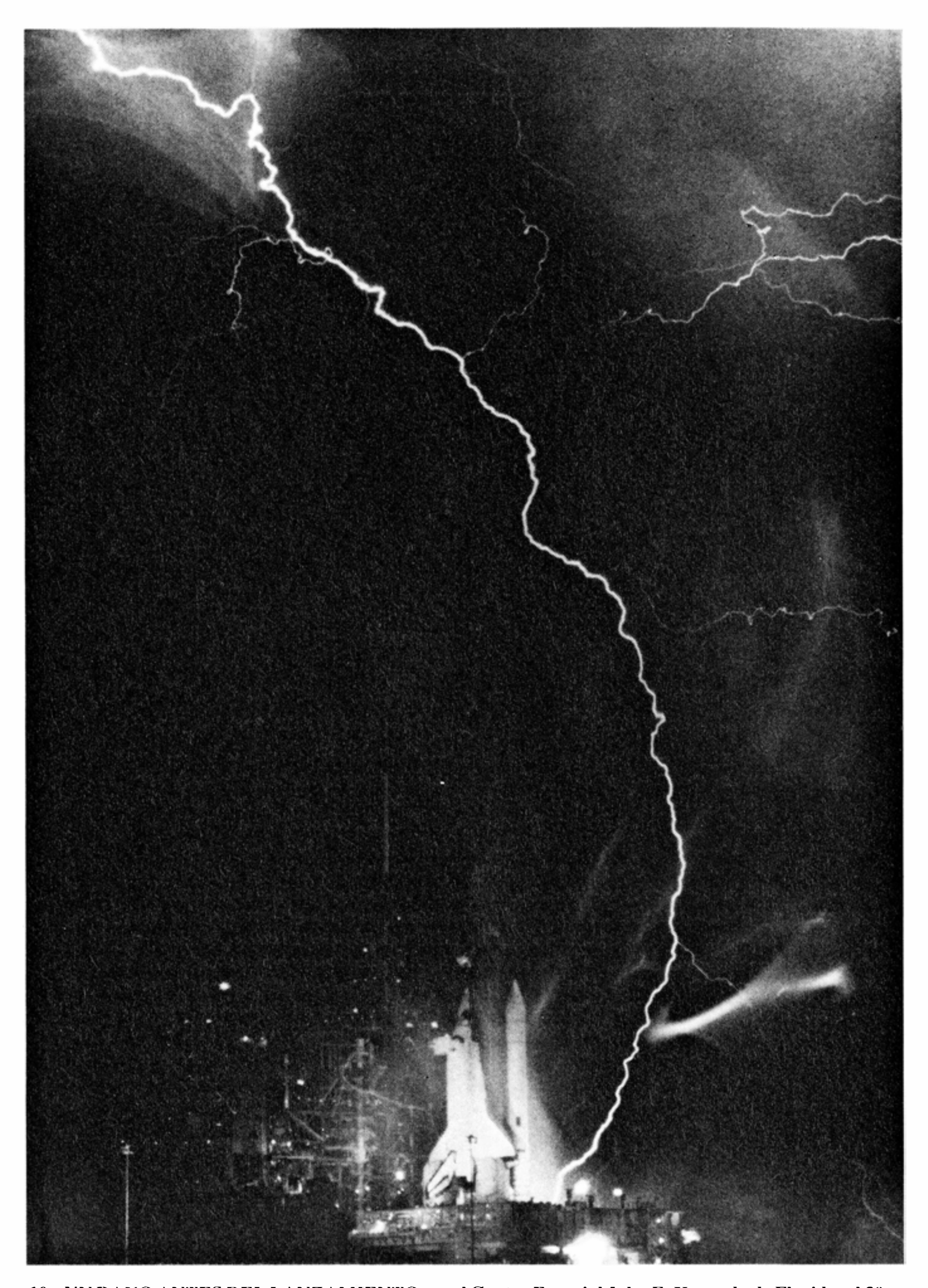
Se cree que la mayor parte de la energía eléctrica de una tormenta se libera en forma de rayos. Como se indicó antes, una tormenta de modestas proporciones produce algunos rayos por minuto y libera una potencia comparable a la de una central nuclear. Ciertas leyes sencillas de escala, basadas en las ecuaciones del electromagnetismo, muestran que la potencia desencadenada crece aproximadamente con la quinta potencia del tamaño de la nube: duplicar las dimensiones de la nube implica multiplicar la potencia liberada por 30. Las tormentas grandes pueden producir rayos a razón de más de 100 descargas por minuto.

De acuerdo con una ley contrastada nada hay en física que sea gratis. La energía eléctrica liberada por los rayos debe proceder de alguna parte. En último término, proviene del calor que provoca la expansión del vapor de agua, se haga éste menos denso que el aire exterior y, por consiguiente, ascienda. Durante su ascensión, el vapor se va condensando en forma líquida o sólida; el calor latente se desprende y el agua líquida o hielo comienzan a caer. La energía potencial gravitatoria liberada por la precipitación que cae es, según el modelo de la precipitación, la energía disponible para electrificar las nubes; se calcula multiplicando la fuerza gravitatoria ejercida sobre la precipitación por la distancia caída.

Las mediciones, obtenidas por radar, de la precipitación de lluvia y partículas de granizo blando muestran que, en tormentas modestas, la energía gravitatoria supera, de lejos, la energía eléctrica liberada por los rayos. Para tormentas dotadas de extraordinaria actividad, en las que la energía eléctrica puede ser varios órdenes de magnitud mayor, la energía gravitatoria y la eléctrica vendrían a ser aproximadamente iguales. Basándose en la ley de conservación de la energía sería, pues, de esperar que, en el momento de producirse un rayo, cuando las fuerzas eléctricas disminuyen de forma brusca, la velocidad de caída de la precipitación debería aumentar bastante. Se ha intentado medir el fenómeno mediante un radar Doppler, capaz de establecer la velocidad de un objeto en movimiento; hasta ahora, todos los esfuerzos han fracasado. La ausencia general de cambios bruscos de velocidad no ha recibido todavía una explicación satisfactoria, aunque los cambios pequeños de velocidad podrían quedar enmascarados por los movimientos turbulentos de las tormentas.

Existe otro equilibrio más de energía que debe preservarse: el relativo al circuito eléctrico global. La atmósfera terrestre constituye un aislante de extraordinaria calidad y está colocada entre dos buenos conductores: la superficie terrestre abajo y la alta atmósfera e ionosfera arriba [*véase la figura 9*]. Estas capas son los componentes pasivos del circuito eléctrico global.

Entre la superficie de la Tierra, cargada negativamente, y la atmósfera, cargada positivamente, hay una diferencia de potencial constante de unos 300.000 volt. Siguiendo la idea propuesta por Wilson, hace más de 70 años, se admite que este "potencial ionosférico" de 300 kilovolt es el resul-



10. UN RAYO ANTES DEL LANZAMIENTO, en el Centro Espacial John F. Kennedy de Florida, el 30 de agosto de 1983, cayó rozando el transbordador espacial. La tormenta pasó y el transbordador se lanzó, de acuerdo con el programa, a las 02:32 horas del tiempo local. En todo el mundo se producen diariamente unas 44.000 tormentas y ocho millones de rayos. Solamente en los Estados Unidos de Norteamérica, el rayo causa anualmente unas 150 muertes y pérdidas materiales de 20 millones de dólares en daños, y origina unos 10.000 incendios forestales que destruyen madera utilizable por valor de treinta millones de dólares.

tado de la carga efectuada por las tormentas, que actúan como "baterías" del circuito global. De las cimas positivas de las nubes tormentosas fluyen corrientes eléctricas, de alrededor de un ampère por tormenta, dirigidas hacia arriba; retornan a la Tierra en las regiones de buen tiempo de la atmósfera.

Para que la carga no se acumule indefinidamente en las nubes, es preciso que fluya una corriente de un ampère desde la superficie terrestre hasta la base de las nubes. La carga transportada por la lluvia, la descarga en corona y el rayo contribuyen a este transporte de cargas; ahora bien, en latitudes medias no basta para compensar la corriente de retorno de buen tiempo. ¿Cómo compensar ese déficit? Las baterías que faltan se encuentran en los trópicos, donde las tormentas, varios órdenes de magnitud mayores que en latitudes medias, producen suficientes rayos por unidad de tiempo para cargar el circuito global.

Cabría preguntarse por qué la Tierra está cargada negativamente. De acuerdo con la conjetura que goza de mayor verosimilitud, la carga negativa de la Tierra se debe a su proximidad al polo negativo de la batería tormentosa. La pregunta se trueca entonces en la siguiente: ¿por qué la parte inferior de una nube tormentosa es, predominantemente, negativa? La respuesta a esta pregunta depende, una vez más, de la microfísica del hielo, disciplina de la que sabemos muy poco.

Pese a tantas preguntas sin respuesta, comienza ya a perfilarse un marco teórico vertebrado de la electrificación de las nubes, donde se enlaza la separación de cargas, que ocurre a escala atómica, con las chispas que viajan varios kilómetros de distancia y con un circuito eléctrico que abarca la Tierra entera.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATMOSPHERIC ELECTRICITY. John A. Chalmers. Pergamon Press, 1967.

THE THUNDERCLOUD. C. B. Moore y B. Vonnegut en *Lightning*, vol. 1: *Physics of Lightning*, editado por R. H. Golde. Academic Press, 1977.

THE LIGHTNING DISCHARGE. Martin A. Uman. Academic Press, 1987.

THE ROLE OF ELECTRIC SPACE CHARGE IN NUCLEAR LIGHTNING. Earle R. Williams, Chathan M. Cooke y Kenneth A. Wright en *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, n.º D2, págs. 1679-1688; 20 de febrero de 1988.

THE ELECTRIFICATION OF THUNDERSTORMS. Earle R. Williams en *Journal of Geophysical Research*, en prensa.

Turbulencia superfluida

El helio líquido enfriado hasta 2,172 grados por encima del cero absoluto fluye sin viscosidad ni fricción, pero raramente sin turbulencia. La singular forma de esta última es de naturaleza mecánico-cuántica

Russell J. Donnelly

A sir Horace Lamb, matemático y físico británico, se le atribuye la siguiente observación, que él haría en 1932: "Soy ya viejo, y cuando muera y vaya al cielo espero ver claras dos cosas. Una es la electrodinámica cuántica y la otra es el movimiento turbulento de los fluidos. Respecto a la primera soy bastante optimista". Esa confesión mereció la siguiente apostilla de Sydney Goldstein, de la Universidad de Harvard: "Lamb acertó en dos cosas. Cuantos le conocieron están de acuerdo en que entró en el cielo y acertó en mostrarse más optimista acerca de la electrodinámica cuántica que de la turbulencia".

La mayoría de los flujos, así en la naturaleza como en la técnica, son turbulentos. Además, buena parte de la energía que gastan las máquinas y los dispositivos implicados en corrientes de fluidos se destina a vencer la resistencia opuesta por la turbulencia. He ahí, pues, una sólida razón para intentar desentrañar ese fenómeno. El estudio de los flujos turbulentos es, no obstante, una de las materias que presenta mayor dificultad en física e ingeniería. Ningún aspecto substancial del movimiento turbulento puede explicarse aún del todo a partir de los principios generales.

Para nuestra sorpresa, la peculiar turbulencia de tipo mecánico-cuántico que se puede formar en helio superfluido (un tipo de helio líquido que fluye sin viscosidad ni fricción) podría resultar mucho más fácil de entender que la turbulencia clásica que se forma en fluidos normales, tales como los cursos rápidos o el agua hirviendo. La sorpresa crece cuando se observa que, hasta hace pocos años, este campo de investigación era considerado un callejón sin salida en física de materia condensada.

Parece que el estudio de la turbulencia superfluida podría ahora proporcionar modelos simplificados para abordar algunas formas de turbulencia clásica. Hay además motivos prácticos para el estudio de la turbulencia superfluida. Recuérdese que el helio superfluido es refrigerante habitual en maquinaria superconductora. La turbulencia superfluida constituye el principal impedimento para la transferencia de calor mediante el helio superfluido; la comprensión del fenómeno podría permitir el diseño de métodos más eficientes para la refrigeración de dispositivos superconductores.

RUSSELL J. DONNELLY es catedrático de física en la Universidad de Oregon. Nació en Hamilton, Ontario, y se educó en la Universidad McMaster. Yale le concedió el doctorado en 1956. Enseñó en la de Chicago desde 1956 hasta 1966, año en que se trasladó a Oregon. En 1972 ocupó una plaza de profesor visitante en el Instituto Niels Bohr de Copenhague. Donnelly es editor adjunto del *Physical Review A*.

El medio en el que se desarrolla la turbulencia superfluida –helio superfluido– es insólito. A presión atmosférica, el helio gaseoso licúa cuando se enfría hasta una temperatura de 4,2 grados Kelvin. (Cero grados Kelvin –cero absoluto– corresponde a unos 273 grados centígrados por debajo de cero.) El líquido puede enfriarse aún más conectando una bomba de vacío con el recipiente que contiene el líquido; al relajar la presión del recipiente, rebaja el punto de ebullición del líquido; las partes del líquido que están más calientes que el nuevo punto de ebullición se convierten en gas y son aspiradas por la bomba de vacío. Cuando el líquido se enfría desde 4,2 hasta 2,172 grados, burbujea vigorosamente. En este rango de temperaturas, el helio líquido, conocido por helio I, se comporta como un fluido ordinario y conduce mal el calor.

A 2,172 grados, sin embargo, el burbujeo cesa de repente y el líquido adquiere ciertas propiedades nada comunes: fluir sin viscosidad ni fricción y filtrarse a través de hendiduras demasiado estrechas incluso para que penetren los gases. Este líquido, que mantiene tales propiedades mientras se enfría hasta el cero absoluto, se denomina helio II o helio superfluido. El helio líquido para de burbujear cuando se enfría por debajo de los 2,172 grados debido a otra propiedad espectacular del helio II: posee una conductividad térmica altísima (cerca de 10 millones de veces superior a la conductividad térmica del helio I); por ello resulta imposible que se formen partes aisladas calientes y burbujas. Los descubridores de este fenómeno, Willen H. Keesom y su hija Annie Keesom, de la Universidad de Leiden, llamaron al helio II superconductor de calor; no les faltaba razón.

¿Qué subyace bajo las extrañas propiedades del helio II? La respuesta, demasiado compleja para darla aquí en detalle, se apoya en el carácter mecánico-cuántico del fluido de helio II: a tan bajas temperaturas, las leyes clásicas de la mecánica de fluidos se sustituyen por las leyes de la mecánica cuántica.

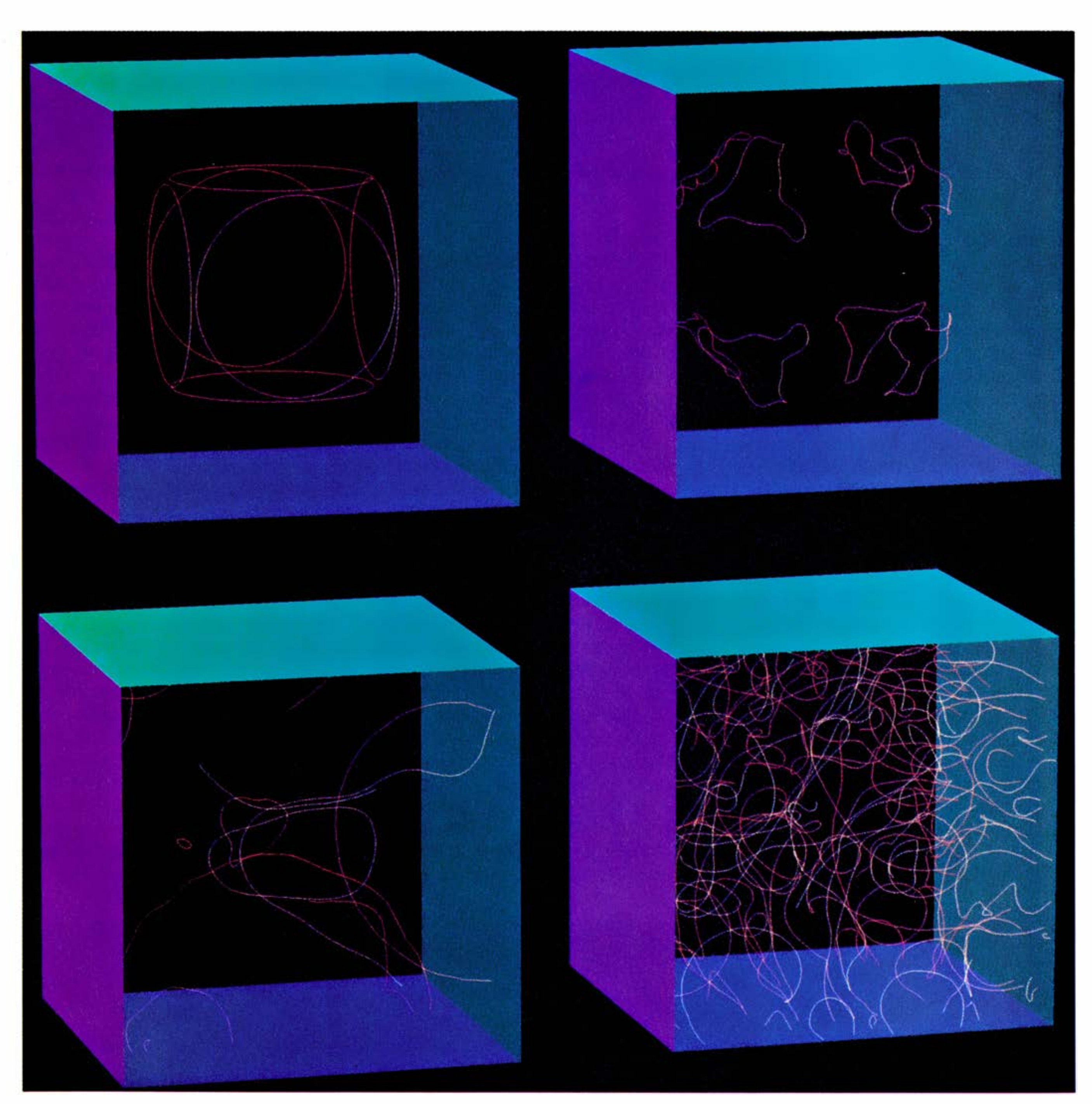
Según la mecánica cuántica, un átomo debe ocupar un estado, es decir, uno de los niveles energéticos de un conjunto determinado. La cantidad de energía inherente a cada estado depende de las energías de los electrones atómicos y de las propiedades globales del átomo, incluyendo su vibración y su estado de movimiento. Cuando un átomo se mueve, puede adquirir energía (por ejemplo, mediante colisiones), pero la debe adquirir en cantidades determinadas: en cada suceso debe ganar, por lo menos, energía suficiente para pasar al estado energético inmediatamente superior.

Debido a ciertas propiedades del núcleo de helio, muchos átomos de una muestra de helio líquido caerán, en el

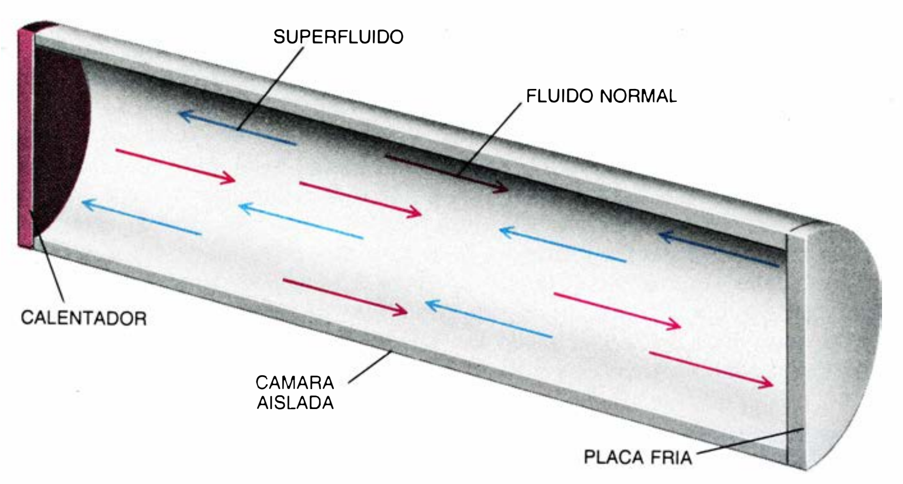
cero absoluto, al estado de menor energía posible. El estado energético siguiente tiene una energía algo superior que el estado más bajo, de manera que sólo las perturbaciones de bastante energía pueden llevar el fluido a dicho estado. Las perturbaciones de baja energía, pensemos en las debidas al rozamiento, no pueden actuar sobre el fluido y así éste queda totalmente insensible a la acción del rozamiento. Por tanto, una muestra de helio superfluido fluye como un todo, sin fricción.

Esta visión no explica enteramente todo el asunto. A cualquier temperatura por encima del cero absoluto, el líquido estará expuesto a excitaciones aleatorias (vibraciones, por ejemplo) debidas al calor. Algunas de estas excitaciones poseerán suficiente energía para sacar a los átomos de helio del estado de menor energía. Ocurre entonces que tales excitaciones pueden "fluir" a través del superfluido; en ese sentido, una vibración puede pasar a través del líquido, de átomo en átomo. De hecho, las excitaciones se comportan muchas veces como átomos de un fluido normal: pueden "colisionar" con las paredes del recipiente y entre sí.

La descripción mecánico-cuántica de la situación resultante es compleja, pero resulta que una manera de describir el transporte de estas excitaciones consiste en imaginar que el helio líquido a temperaturas por encima del cero absoluto constituye una mezcla de dos fluidos interpenetrantes: un superfluido y un fluido normal. En cierto



1. INICIO DE LA TURBULENCIA en el helio superfluido (un tipo de helio líquido que fluye sin viscosidad o fricción). Se ha recreado en esta simulación de Klaus W. Schwarz, del Centro de Investigaciones Thomas J. Watson de la IBM. Las líneas delgadas representan los núcleos de los vórtices cuantificados: vórtices alrededor de los cuales el helio superfluido circula a velocidades determinadas con precisión. Al principio de la simulación (*arriba a la izquierda*), los núcleos de los vórtices se disponen de manera ordenada; cada núcleo está curvado y forma un bucle sencillo; los anillos guardan una disposición simétrica. A medida que la simulación evoluciona (*arriba a la derecha y abajo a la izquierda*), los núcleos se tuercen y curvan hasta terminar enredados (*abajo a la derecha*).



2. MODELO DE LOS DOS FLUIDOS para explicar diversas propiedades del helio superfluido. Según este modelo, una muestra de helio superfluido consta de dos fluidos interpenetrantes: un superfluido (*azul*), que fluye sin fricción y, en cierto sentido, tiene una temperatura de cero absoluto, y un fluido normal (*rojo*), que fluye con rozamiento normal y transporta todo el calor de la muestra. Un calentador situado en uno de los extremos de un conducto con helio superfluido produce un contraflujo: el fluido normal "creado" en el calentador fluye hacia el otro extremo del conducto, mientras que el superfluido fluye en sentido opuesto.

sentido, el componente superfluido se encuentra en el cero absoluto, mientras que cualquier calor de la mezcla se transporta mediante el fluido normal. Las concentraciones relativas de superfluido y fluido normal dependen de la temperatura; en el cero absoluto, el líquido es enteramente superfluido, y justo por encima de los 2,172 grados es ya un fluido normal. Los dos fluidos pueden fluir uno a través del otro sin fricción, debido a la naturaleza especial del superfluido.

El modelo de los dos fluidos permite entender por qué los superfluidos son buenos conductores del calor. Supongamos que un calentador eléctrico se encuentra colocado en un extremo de un conducto lleno de helio II y ponemos una placa fría en el otro extremo. "Creamos" entonces, en el calentador, fluido normal que fluye hacia la placa fría. Al mismo tiempo, el superfluido fluye en dirección opuesta, hacia el calentador, equilibrando exactamente el curso de fluido normal. Las velocidades de los dos flujos dependen de la diferencia de temperaturas entre el calentador y la placa fría, así como de las concentraciones relativas de fluido normal y de superfluido.

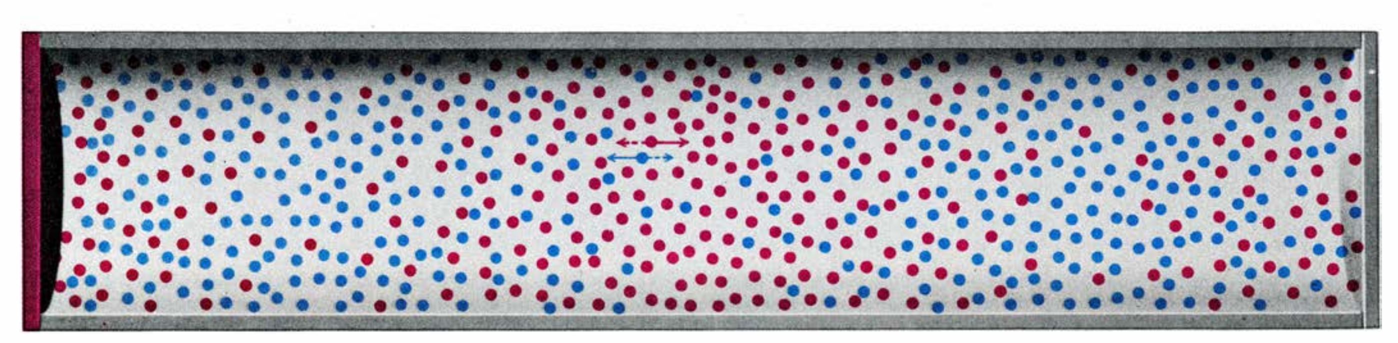
El fluido normal roza las paredes del conducto al transportar calor desde el calentador, pero el superfluido (que no transporta calor) se desliza libremente a lo largo de las paredes del conducto; los dos fluidos fluyen uno a través del otro sin fricción. Por consiguiente, la enorme conductividad calorífica del helio II no tiene su origen en los mecanismos normales de movimiento atómico, donde el calor se transfiere mediante colisiones entre átomos, sino en una fuerte oposición de flujos, o contraflujo, entre el fluido normal que se mueve en un sentido y el superfluido que lo hace en el otro. El calor fluye directa y velozmente de un extremo del conducto al otro, en vez de viajar en un proceso de difusión, más lento.

El modelo de los dos fluidos nos lleva a una cuestión clave: ¿cómo se comporta este fluido complejo bajo condiciones de rotación u otras? Se podría pensar que, si el helio II se inyecta en un recipiente en rotación, el fluido normal girará con las paredes del recipiente en virtud del rozamiento a que se ve sometido, mientras que el superfluido permanecerá en reposo. Lo cual es verdad para velocidades de rotación muy lentas; para un recipiente con un radio de un centímetro, la rotación será inferior a 0,03 revoluciones por minuto, unas 40 revoluciones por día. Para velocidades de rotación más rápidas, sin embargo, los dos fluidos parecen girar juntos.

A principios de los años cincuenta, Lars Onsager, de la Universidad de Yale, y Richard P. Feynman, del Instituto de Tecnología de California, propusieron, basándose fundamentalmente en argumentos teóricos, que el componente superfluido giraba de manera mucho más complicada que como lo hacían los fluidos normales. Sugirieron que aparecían "vórtices cuantificados" en el recipiente en rotación.

Los vórtices o remolinos cuantificados constituyen los elementos de la turbulencia superfluida, lo mismo que remolinos y torbellinos normales forman la turbulencia clásica. Son objetos notables. El núcleo de cada vórtice tiene un diámetro aproximado de un angstrom (10^{-10} metros), una cuarta parte aproximadamente de la distancia media entre los átomos del fluido, y no contiene átomos del superfluido (del mismo modo que el núcleo de un remolino que se forma en un desagüe no tiene agua). En términos de la mecánica cuántica, el núcleo es un nodo de la "función de onda" que describe al superfluido: la probabilidad de encontrar allí un átomo de helio es nula.

La manera como los átomos circulan alrededor del núcleo de un vórtice viene también determinada por la mecánica cuántica. De acuerdo con ésta, podemos asociar, en cierto sentido, cada átomo de helio superfluido a una onda. La longitud de onda del átomo depende de la velocidad de su movimiento circular en el vértice; además, debe caber un número entero de longitudes de onda en el recorrido del átomo alrededor del núcleo del vórtice. En con-



3. "SONIDO SECUNDARIO", un fenómeno análogo del sonido ordinario; aparece en un conducto o canal de helio superfluido siempre que un calentador situado en un extremo se conecta y desconecta rápidamente. En una "onda" de sonido secundario, las regiones que tienen una concentración alta de fluido normal se alternan con las zonas que presentan una alta concentración de superfluido. Los fluidos oscilan con alta celeridad en sentidos contrapuestos.

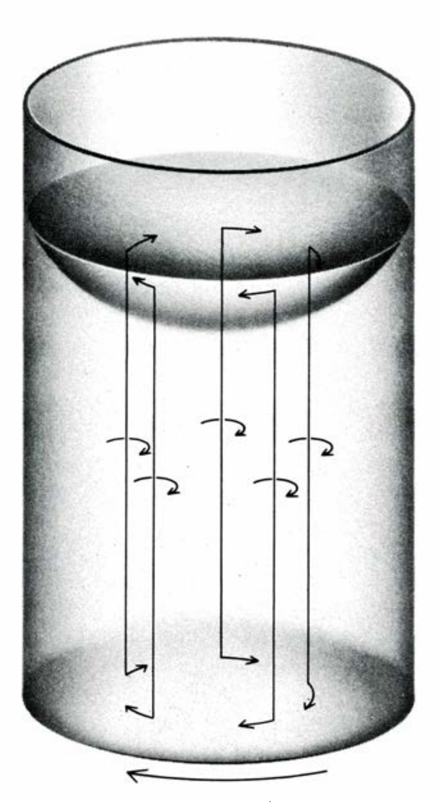
secuencia, la velocidad del movimiento del átomo está cuantificada: un átomo que viaja a cierto radio del centro del núcleo puede moverse solamente con una velocidad, dentro de un conjunto determinado de valores.

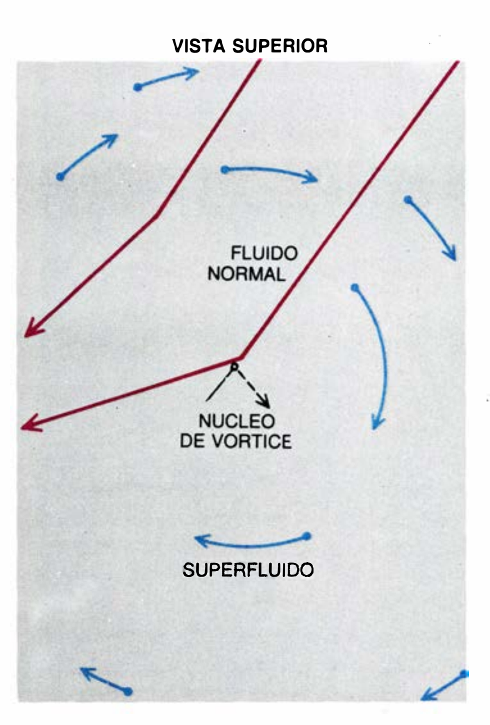
En general, los átomos de helio tienden a viajar alrededor del núcleo del vórtice a la mínima velocidad posible. Así, la velocidad tangencial de cada átomo es igual a la constante de Planck (la constante fundamental de la mecánica cuántica) dividida por el radio del movimiento circular del átomo, por la masa del átomo y por 2π. La fórmula mediante la cual se determina la velocidad es casi idéntica a la fórmula utilizada por Niels Bohr para establecer las características de la órbita de un electrón alrededor de un núcleo atómico.

Los núcleos de los vórtices fluyen desde la superficie superior del líquido hasta el fondo del recipiente. Si se forman varios núcleos de vórtices en un único recipiente giratorio, el conjunto entero de núcleos de vórtices gira exactamente a la misma velocidad angular que las paredes del recipiente.

El fluido normal, aunque no circula alrededor de los núcleos de los vórtices, se ve afectado por ellos. Si un flujo de fluido normal pasa cerca del núcleo de un vórtice, puede dispersarse o desviarse. Consecuentemente, los núcleos de los vórtices se oponen a la transmisión de calor a través del superfluido. A su vez, el flujo de fluido normal condiciona el comportamiento de los núcleos de los vórtices: cuando un núcleo de vórtice desvía el flujo de fluido normal, el núcleo se echa a un lado y se inclina ligeramente.

Se tardó muchos años en corroborar experimentalmente que Onsager y Feynman andaban en lo cierto. Lo que no debiera sorprendernos, si tenemos en cuenta que el volumen total ocupado por los núcleos de los vórtices de un recipiente que gire a 10 r.p.m. es de una billonésima del volumen del recipiente.





4. SE FORMAN VORTICES CUANTIFICADOS cuando un recipiente que contiene helio superfluido se sitúa en una mesa giratoria (*izquierda*). El superfluido circula alrededor de los vórtices y éstos, a su vez, se mueven con el recipiente giratorio. La velocidad a la que una partícula superfluida circula alrededor de un núcleo de vórtice (*derecha*) es proporcional al inverso de la distancia entre la partícula y el núcleo: las partículas más cercanas al núcleo viajan más deprisa. El núcleo no contiene superfluido. Cuando el fluido normal (*rojo*) fluye cerca del núcleo, se desvía y el núcleo es arrojado a un lado por un proceso de fricción mutua. Los vórtices cuantificados interrumpen el flujo de calor (y el sonido secundario) a través del recipiente.

Y, ¿cómo pueden detectarse objetos tan diminutos? Hay un método que recurre al sonido secundario, un fenómeno de tipo ondulatorio. Entenderemos mejor ese fenómeno mediante una analogía con el sonido corriente.

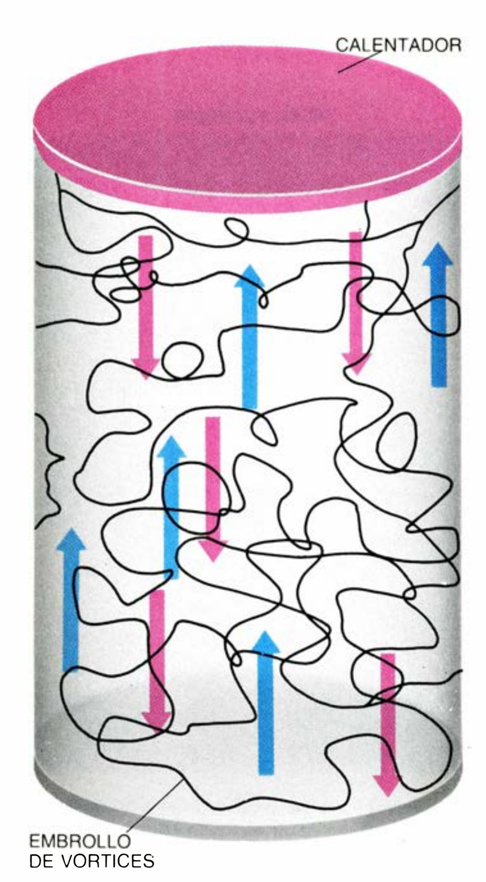
Un altavoz común se reduce a una placa capaz de vibrar. Cuando vibra realmente, empuja el aire adelante y atrás, creando de modo alternante regiones de aire denso y de aire rarificado: una onda de densidad. Esta onda de densidad es una onda sonora.

Supongamos ahora que una placa agujereada por poros muy finos se sitúa en un extremo de un conducto donde hay helio II. Si los agujeros son suficientemente finos, el componente de fluido normal del helio II no los podrá atravesar. Sin embargo, el componente superfluido sí podrá pasar a través de los mismos, debido a su falta de viscosidad. Si la placa vibra, empujará el fluido normal hacia adelante y hacia atrás, sin ejercer fuerza directa alguna sobre el superfluido. Esto creará regiones donde habrá una alta densidad de fluido normal, alternándose con regiones que registrarán una baja densidad de fluido normal: una onda de sonido secundario.

Cuando se transmite una onda de sonido secundario a través de un conducto, el componente superfluido se ve obligado a fluir de un lado a otro hasta equilibrar exactamente el curso de un lado al otro del fluido normal; los dos componentes fluyen uno "a través" del otro en sentido opuesto. Por ello, la densidad global del líquido en el conducto no varía (al contrario de lo que ocurre en una onda sonora normal). Así, pues, una onda de sonido secundario es, en realidad, una onda de concentraciones relativas. Las regiones donde la concentración de fluido normal es alta y la concentración de superfluido es baja se alternan con las regiones donde la concentración de superfluido es alta y la concentración de fluido normal es baja.

Existe otra manera de abordar la cuestión: asociar la onda de sonido secundario a una onda de temperatura, en la que regiones de temperatura relativamente alta (regiones que contienen una concentración elevada de fluido normal) se alternan con regiones de baja temperatura (regiones que contienen una elevada concentración de superfluido). La verdad es que otra forma de generar sonido secundario se funda en este mismo punto de vista: se genera sonido secundario encendiendo y apagando rápidamente un calentador. Periódicamente, el calentador arranca y detiene un contraflujo, generado por el calor, de helio normal y de helio superfluido. A altas frecuencias, estos contraflujos oscilantes forman una onda de sonido secundario.

¿De qué manera puede ayudarnos el sonido secundario para detectar vórtices cuantificados? Recordemos que éstos interrumpen el flujo del componente de fluido normal del helio II. Perturban, por tanto, los movimientos oscilatorios del fluido normal que dan lugar a una onda de sonido secundario. Así, pues, de igual modo que los de-



5. TURBULENCIA SUPERFLUIDA, una auténtica maraña de vórtices cuantificados, se genera cuando el calentador de un extremo del conducto envía más de cierta cantidad crítica de calor a través de dicho medio. El contraflujo de fluido normal (*rojo*) y superfluido (*azul*) desvía y tuerce los vórtices.

flectores de sonido pueden atenuar una onda sonora corriente, los vórtices cuantificados pueden debilitar una onda de sonido secundario en un conducto de helio II. En el año 1956, William F. Vinen y Henry Hall, de la Universidad de Cambridge, recurrieron a la atenuación del sonido secundario para realizar la primera observación de un conjunto de vórtices en un recipiente giratorio de helio II.

La sensibilidad de las observaciones de la atenuación del sonido secundario es extraordinaria. En nuestro laboratorio de la Universidad de Oregon, podemos detectar cambios de hasta 20 centímetros en la longitud de las líneas de vórtice en un centímetro cúbico de helio II. En tal experimento, el volumen total de la línea de vórtice adicional no llega a una parte en 10^{14} del volumen total del helio líquido.

El conjunto de vórtices cuantificados que aparecen al hacer girar recipientes con helio II no es lo que he designado por "turbulencia superfluida"; es demasiado ordenado. Cuando los expertos en dinámica de fluidos hablan de turbulencia clásica, se refieren a los complejos esquemas que se pueden desarrollar en corrientes rápidas de fluidos, tales como la corriente de aire en un túnel de viento. De manera similar, por "turbulencia superfluida" entiendo el esquema complejo de vórtices que puede surgir en un conducto lleno de helio II cuando la velocidad relativa entre los flujos contrarios de componentes normal y superfluida es alta.

Supongamos, por ejemplo, que se controla la temperatura en los dos extremos de un conducto lleno de helio II, mientras que incrementamos gradualmente la potencia del calentador, colocado en un extremo. Al principio, la diferencia de temperaturas entre los extremos del conducto será pequeña, debido a la alta conductividad térmica del helio II. Sin embargo, para cierta potencia crítica del calentador, la diferencia de temperaturas subirá de repente. En otras palabras, cuando se transporta cierta cantidad de calor a lo largo del conducto –cuando la velocidad de contraflujo ha alcanzado un determinado punto crítico–, decrece la conductividad térmica del fluido.

Las mediciones de la atenuación del sonido secundario han mostrado que este decrecimiento brusco de la conductividad térmica débese a la formación de vórtices cuantificados, que entorpecen el proceso de contraflujo. La absorción de sonido secundario viene a ser la misma en todas las direcciones, señal de que estos vórtices, a diferencia de los que aparecen en un recipiente giratorio, no se encuentran todos ellos alineados en una sola dirección. Diríase, en cambio, que los núcleos de los vórtices se encuentran girados, ladeados y apilados, formando un complejo enredo; algunos de ellos cierran bucles enteros, mientras que otros recorren trayectorias alargadas y retorcidas desde una pared del conducto hasta la otra. En conclusión, de la misma manera que una corriente rápida de agua en un arroyo puede llevar a la formación de remolinos y torbellinos irregulares, así el rápido fluir en sentidos contrarios de las componentes normal y superfluida puede causar la formación de un conjunto irregular de núcleos de vórtices cuantificados. Feynman habíase anticipado al hecho partiendo de principios teóricos; Vinen publicaría luego su primera observación de vórtices cuantificados.

El complejo enredo de vórtices que se generan en rápidos flujos contrarios constituye la turbulencia superfluida; se le llama también turbulencia cuántica. La turbulencia superfluida es uno de los fenómenos más sorprendentes que se dan asociados a la superfluidez. Después de todo, en el nivel más fundamental, un núcleo de vórtice representa un lugar donde no hay superfluido. Sin embargo, la formación y movimiento de esta entidad, que carece prácticamente de masa y ocupa una diminuta fracción de volumen en el conducto, ejerce un profundo efecto en la conducción de calor a través del helio II.

La turbulencia superfluida se estudia observando las diferencias de temperatura y la atenuación del sonido secundario; se acude también a la trampa de iones. En esta técnica, cierta corriente de iones de helio (átomos cargados eléctricamente) pasa a través de un conducto que contiene helio II. Algunos iones quedan absorbidos por los núcleos de los vórtices y permanecen atrapados allí, por ser la presión más baja en el centro de un vórtice. En ese momento, puede observarse la posición de los iones atrapados, seguir sus movimientos e incluso manipularlos mediante la aplicación de campos eléctricos externos. (Al manipular los iones se puede hacer lo propio con los núcleos de los vórtices en los que se encuentran atrapados.)

Ninguno de estos métodos de observación resulta enteramente satisfactorio. No podemos observar todavía la localización de los iones atrapados en flujos turbulentos. Las medidas de las diferencias de temperaturas y la atenuación de haces de iones y de sonido secundario se realizan a grandes escalas en comparación con la distancia media entre vórtices. Las mediciones nos ofrecen propiedades medias del conjunto enredado de vórtices, tales como su densidad (la longitud del núcleo del vórtice por unidad de volumen). La turbulencia clásica admitía, a menudo, la medición de las velocidades locales y las fluctuaciones de presión de un remolino.

¿Cómo sabemos, entonces, que la turbulencia superfluida sea una turbulencia? Responderemos a esta pregunta comparando algunas características de las turbulencias clásica y cuántica.

Lo obvio es que los flujos turbulentos clásicos sean irregulares y, también, las marañas de vórtices de la turbulencia cuántica. En la clásica, remolinos y torbellinos locales se desarrollan, van de un lado a otro y desaparecen al azar; de manera similar, en la turbulencia superfluida los núcleos de los vórtices se retuercen, se doblan y giran de manera impredecible. Tal parece en ambos ca-

sos. La turbulencia clásica es gran disipadora de energía; en la turbulencia superfluida, el componente superfluido, que es el componente que circula alrededor de los vórtices cuantificados, no puede disipar energía porque carece de viscosidad, pero el rozamiento entre los núcleos de los vórtices y el componente de fluido normal es muy disipativo: un contraflujo turbulento genera calor por disipación viscosa cuando se interrumpe el movimiento ordenado del fluido normal.

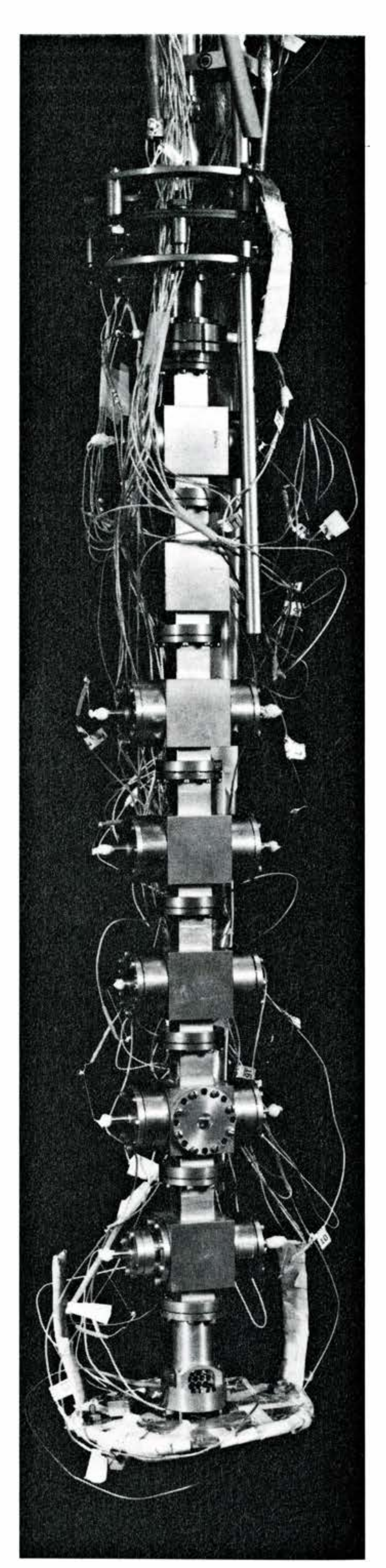
Existen también profundas diferencias entre la turbulencia clásica y la turbulencia superfluida. Esta parece producirse localmente en todos los puntos del flujo y resultar homogénea; aquélla se produce frecuentemente cuando los cursos de fluido superan un obstáculo; el movimiento turbulento decae tras dicho obstáculo. Ocurre con frecuencia, en turbulencia clásica, que un vórtice se alargue, o estire, mientras que el diámetro de su núcleo se estrecha; los vórtices individuales cuantificados pueden estirarse, pero no reducir el diámetro de sus núcleos, porque el tamaño del núcleo está ya en un mínimo mecánico-cuántico. Por otro lado, un haz de vórtices puede "estrecharse", al apiñarse para su alargamiento; en la turbulencia clásica, los tamaños de los vórtices varían de forma sin cesar, desde el diámetro del conducto hasta dimensiones mínimas, hasta el punto de que acaben desapareciendo por fricción interna.

Los vórtices cuantificados pueden formar estructuras —nudos— que alcancen la magnitud del conducto o sean de dimensiones atómicas; ahora bien, en escalas intermedias, la velocidad de circulación estrictamente cuantificada alrededor de cada núcleo de vórtice impone ciertos límites al tamaño y estructura de los nudos.

El estudio de la turbulencia superfluida no entraña especial dificultad. Fácil de producir, posee una escala compacta y surge en un fluido cuyas propiedades son sencillas y conocidas con precisión. Es posible producirla y estudiarla en conductos cuyos diámetros varían desde una micra (una millonésima de metro) hasta unos cuantos centímetros. Otras propiedades clave pueden variar también en un amplio rango. La longitud de vórtice por unidad de volumen en el conducto puede variar en cinco órdenes de magnitud (esto es, puede variar en un factor del orden de 100.000); la razón entre las concentraciones de fluido normal y superfluido puede variar en más de dos órdenes de magnitud (un factor 100).

En la mayoría de los experimentos de turbulencia cuantificada, el fluido normal procede sin turbulencia o con una turbulencia muy débil, por cuya razón no complica el cuadro experimental. Además, las leyes que rigen los movimientos de los núcleos de los vórtices son bien conocidas en sus supuestos básicos [*véase la figura 8*]. En muchos aspectos, los núcleos de los vórtices se comportan como si fueran cuerdas finísimas sometidas a fuertes tensiones. (En ciertos experimentos con trampas de iones se ha llegado incluso hasta pinzar un núcleo de vórtice como si fuera una cuerda de guitarra, transmitiendo así ondas vibratorias por toda su longitud.) Los cursos de fluido normal y de superfluido alrededor de los núcleos pueden actuar contra esta tensión interna, provocando que los núcleos se muevan, curven y tuerzan.

A William Vinen —pionero en la detección de vórtices cuantificados— se le debe también el primer estudio serio de la turbulencia superfluida. Utilizando la atenuación del sonido secundario, encontró que, a cierta velocidad crítica de contraflujo (la velocidad relativa entre el fluido normal y el superfluido), es necesario generar una cantidad observable de líneas de vórtice enredadas. Vinen descubrió algunas relaciones más en las que se basa la turbulencia superfluida. Por ejemplo, cuando el flujo de calor (la potencia por unidad de área emitida por el calentador en un conducto con contraflujo) se encuentra muy por encima del valor en el que se establece la turbulencia, la densidad de líneas de vórtice varía como el cuadrado de la velocidad del contraflujo, mientras que la diferencia de temperaturas entre los dos extremos del conducto varía como el cubo del flujo de calor. Vinen desarrolló ecuaciones para describir el crecimiento y la caída de la turbulencia superfluida; propuso, asimismo, mecanismos hipotéticos para explicar algunas



6. APARATO construido por el grupo del autor en la Universidad de Oregon para generar turbulencia superfluida y medir la densidad de nudos de vórtice. El propio conducto de superfluido (*columna central cuadrada*) tiene 38 centímetros de largo y un centímetro de ancho. Un calentador, en la parte superior, genera un contraflujo de helio normal y de superfluido. Los transmisores y receptores de sonido secundario (*cilindros horizontales*) miden la densidad de los nudos de vórtice a través del conducto, al calibrar el grado en que los vórtices obstruyen el paso del sonido secundario. Otro transmisor, instalado en la parte inferior, mide la densidad longitudinal de nudos de vórtice, al enviar una señal de sonido secundario hacia la parte superior del conducto, donde se refleja hacia un receptor situado en el fondo.

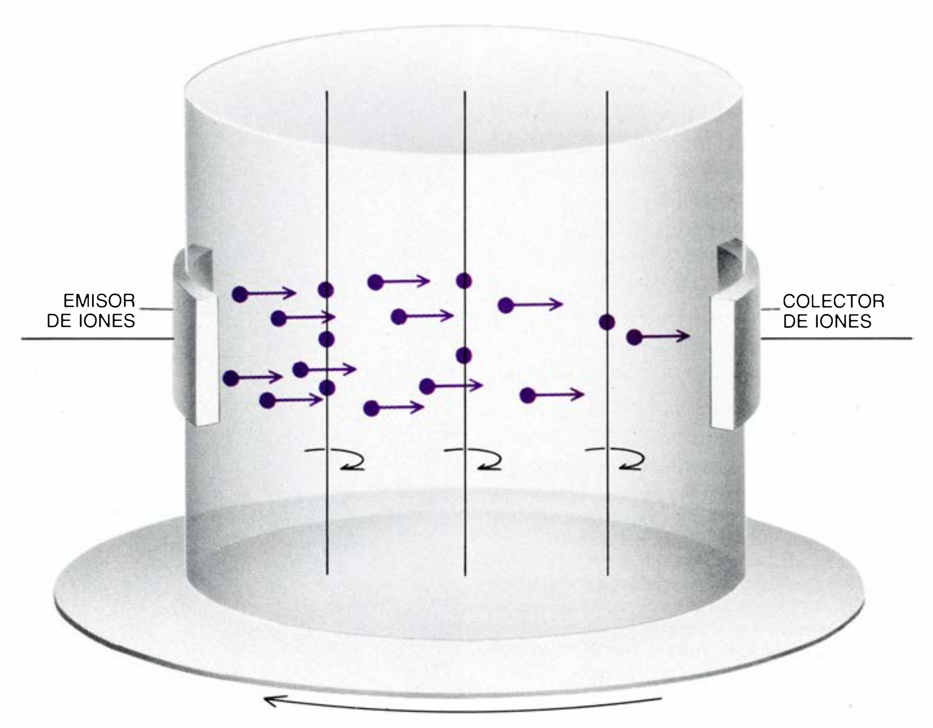
de las relaciones que él había descubierto.

Desde entonces, los investigadores han alcanzado un conocimiento mucho más detallado de las características de la turbulencia superfluida. Por ejemplo, se ha encontrado que la densidad de las líneas de vórtice puede variar según la dirección en que se mida. En 1983, el autor, Carlo Barenghi y Charles E. Swanson, alumnos míos de doctorado, transmitieron simultáneamente sonido secundario a lo largo y a lo ancho de un conducto y midieron el grado en que cada señal se veía atenuada; midieron también la diferencia global de temperaturas entre los dos extremos del conducto. Mostraron que tales mediciones permititirían a los investigadores explorar la anisotropía del nudo (el grado en que parece diferente cuando se observa desde direcciones distintas) y determinar si el nudo de vórtices en conjunto se estuviera moviendo a lo largo del conducto.

Entre 1984 y 1986, sendas tesis de Swanson y Rabi Wang aportaron ya resultados precisos. Descubrieron que el nudo de vórtices parece más denso cuando se mira a lo largo del conducto que cuando se mira a través del mismo. A las temperaturas más bajas, el nudo roza la isotropía; a las temperaturas más altas, cerca del punto de transición al helio I, la densidad del nudo a lo largo del conducto dobla casi la densidad que ofrece a través del mismo. En otro trabajo, Wang ha demostrado que el nudo, en cuanto tal, se mueve hacia el calentador a la misma velocidad que el componente superfluido del líquido.

Varios laboratorios han investigado también qué relación de dependencia guardan las características de la turbulencia con respecto a la forma y tamaño del conducto. A sus resultados debemos que se haya desvanecido gran parte de la confusión que había surgido en este campo: durante muchos años, las conclusiones a las que llegaban los experimentos de diferentes laboratorios parecían contradecirse entre sí, y las contradicciones crecían a medida que se recogían más datos. Dos trabajos recientes —un esquema de clasificación de los estados turbulentos y ciertos refinamientos de la ley de escala— han acabado por aclarar la cuestión.

En 1982, James T. Tough, de la Universidad estatal de Ohio, en un artículo de revisión general de las investigaciones realizadas en turbulencia superfluida, propuso que las diferencias en la geometría del conducto daban como resultado varios tipos de estados turbulentos; introdujo además un criterio para clasificar los géneros de turbulencia. La diferencia esencial entre distintos estados turbulentos reside en la forma como la cantidad de calor transmitida por el conducto por unidad de tiempo varía cuando lo hace la diferencia de temperatura entre los extremos del conducto. Tough observó que cierta peculiaridad de la morfología de la sección transversal del conducto resultaba crucial para determinar qué tipo de turbulencia se generaría en el conducto: se trataba de la razón de forma, que es el cociente entre la anchura del conducto y su altura. En los conductos que son cuadrados o circulares (conductos cuyas razones de forma están cerca de la unidad), existen dos tipos posibles de estado turbulento. En los conductos rectangulares con razones de forma grandes (esto es, razones en torno de 10 a 1), sólo hay un tipo de estado turbulento. Tough estableció las características de cada estado.



7. TECNICA DE CAPTURA DE IONES PARA MEDIR LA DENSIDAD DE LOS VORTICES en una muestra de helio superfluido. Los iones de helio (átomos cargados eléctricamente) se emiten desde una fuente radiactiva situada a un lado de la muestra (*izquierda*); se recogen en el otro lado (*derecha*). A lo largo del recorrido, algunos iones quedan atrapados en el centro de los núcleos de los vórtices. El número de iones atrapados por los núcleos de los vórtices constituye un índice de la densidad de vórtices de la muestra.

Veamos otro avance reciente en el dominio del curso de los superfluidos turbulentos. Se refiere a las propiedades de escala, que constituyen esencialmente un medio de comparar los resultados de los experimentos realizados en sistemas dotados de la misma geometría y muy dispar tamaño. La propiedad de escala permite realizar pruebas en pequeños modelos de laboratorio que serán relevantes cuando los sistemas que se investigan se hayan llevado al tamaño industrial. En la mecánica de fluidos clásica, dos tuberías que sean geométricamente idénticas presentarán las mismas características de flujo si poseen el mismo número de Reynolds: la velocidad de flujo multiplicada por el diámetro de la tubería y dividido por la viscosidad cinemática (la viscosidad dividida por la densidad). Las propiedades de escala clásicas son aplicables incluso en flujos turbulentos.

Los intentos de aplicar las técnicas de escala clásicas a los experimentos de turbulencia cuantificada no tuvieron mucho éxito. Swanson y el autor, siguiendo una sugerencia de Klaus W. Schwarz, hoy en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, se plantearon, en 1984, en qué hechos esenciales discrepaban la turbulencia cuántica y la clásica. Decidieron que el problema fundamental estribaba en que, a una temperatura y presión dadas, un vórtice cuantificado debía tener siempre el mismo radio del núcleo, con independencia de la escala del flujo: el tamaño del núcleo se establece mediante las leyes de la mecánica cuántica y no es más pequeño en una tubería menor. Elaboramos, así, un análogo cuántico del número de Reynolds. Un término clave de tal número de Reynolds cuántico contiene el logaritmo de la razón de la distancia media entre vórtices al tamaño del núcleo del vórtice; otro término contiene la razón entre la cons-

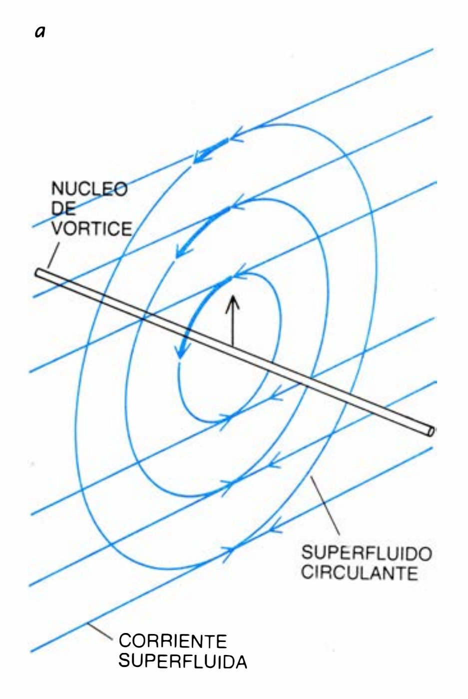
tante de Planck y la masa del átomo de helio. Hasta ahora, el nuevo factor de escala ha resultado plenamente satisfactorio.

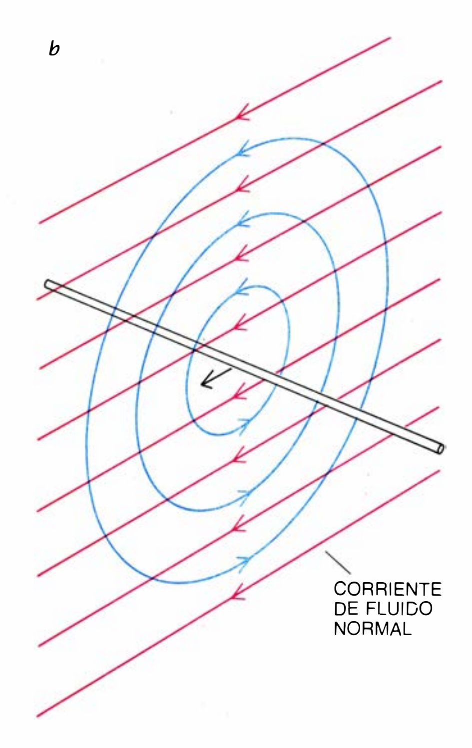
La escala compacta de la turbulencia cuántica permite utilizarla de modelo para estudiar aspectos de la turbulencia clásica. En este sentido, los flujos turbulentos de sistemas en rotación revisten especial interés en geofísica, si bien se han hecho muy pocos experimentos relativos a flujos turbulentos en giro, por culpa, quizá, del tamaño y el coste de los aparatos del túnel de viento necesarios. En cambio, la turbulencia superfluida puede estudiarse fácilmente en una mesa giratoria.

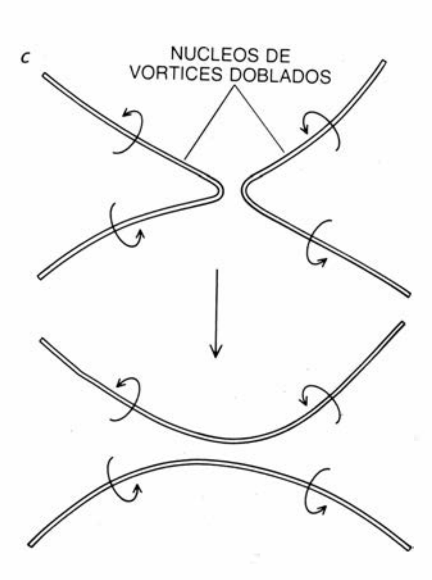
La influencia de la rotación en el flujo turbulento es complicada y casi prohibida para el investigador. No es campo propicio para la intuición, pues vivimos en un entorno que localmente está casi en reposo. Sin embargo, Swanson, Barenghi y el autor han encontrado que las propiedades de la turbulencia cuántica en rotación son sorprendentemente sencillas en los límites de gran flujo de calor y rotación lenta, o de pequeño flujo de calor y rápida rotación.

Por ejemplo, en el límite de gran flujo de calor y rotación lenta, se ha observado que la densidad total de líneas de vórtice es menor que lo que se esperaría de la suma del esquema regular de líneas (que aparecería en virtud de la rotación —recuérdese el experimento de la rotación de un recipiente—) con el nudo irregular (que aparecería con la turbulencia). Hemos llegado a la conclusión de que algunas líneas desempeñan un doble papel: algunas líneas de vórtice inducidas por el calor deben orientarse preferentemente en una dirección paralela al eje de rotación.

La alineación puede aumentarse incrementando la velocidad de rotación; tal ocurre con un gas de dipolos magnéticos, que se alinea incrementando la intensidad de un campo magnético externo. Por lo demás, una y otra situación se aproximan bastante desde el punto de vista matemático: la ecuación que relaciona la alineación de los vórtices con la velocidad de rotación es casi idéntica a la ecuación que relaciona la polarización magnética del gas de dipolos con la intensidad del campo magnético externo. La analogía puede llevarse más lejos. La maraña de vórtices debida al flujo de calor tiende a desordenar su alineación, igual que la agitación térmica causada por un incremento de temperatura desordena un gas de dipolos magnéticos. Así, pues, el estudio de la turbulencia cuántica en un sistema en rotación ha proporcionado a los expertos, de manera inesperada, uno de los pocos equivalentes físicos conocidos del desorden provocado por la agitación térmica.







8. MOVIMIENTO DE LOS VORTICES, condicionado por fuerzas diversas bastante bien conocidas. Cuando una corriente de superfluido pasa cerca de un núcleo de vórtice (*a*), acelera la circulación en un lado del núcleo y la frena en el otro lado. De acuerdo con un principio fundamental de la dinámica de fluidos, la presión es menor en un flujo rápido que en otro lento, de manera que una fuerza ascendente (parecida a la fuerza que sustenta un ala de avión) empuja el núcleo del vórtice en una dirección perpendicular a la seguida por la corriente superfluida. Cuando una corriente de fluido normal pasa cerca de un vórtice (*b*), ejerce una fuerza de arrastre que empuja el núcleo del vórtice en una dirección paralela a la corriente. Un tercer principio del movimiento de los vórtices (*c*) no se conoce tan bien. Cuando dos hileras de vórtices se acercan mucho, se pueden romper y reconectar de modo tal que los extremos rotos de una hilera se junten luego con los extremos rotos, correspondientes, de la otra.

Otra área de investigación productiva es la utilización de ordenadores rápidos y potentes para simular numéricamente el comportamiento de los vórtices. Ante la imposibilidad de observar directamente los movimientos de los vórtices individuales, las simulaciones mediante ordenador constituyen hoy el único medio disponible para investigar la turbulencia superfluida a tan pequeña escala. Con esas simulaciones se pretende determinar el desarrollo y movimiento de un hipotético conjunto de vórtices, resolviendo directamente ecuaciones básicas del movimiento. Las fuerzas ejercidas sobre los vórtices por parte de los flujos o cursos de fluidos normales y de superfluidos se conocen bien. Asimismo, el radio pequeñísimo del núcleo permite modelar el vórtice como un delgado filamento.

Las simulaciones por ordenador de la turbulencia clásica deben modelar el fluido considerándolo un conjunto tridimensional de puntos que se mueven en el espacio. En el caso de la turbulencia cuántica, suponiendo que el propio flujo de fluido normal no sea turbulento, la situación es mucho más sencilla. Sólo se necesita seguir un conjunto unidimensional de puntos —el filamento del vórtice— a medida que se

mueve en el espacio tridimensional. Hasta ahora, sin embargo, sólo Schwarz ha realizado simulaciones numéricas significativas de la turbulencia cuántica; y a él se deben grandes progresos en la simulación de diversos casos especiales, durante los últimos ocho años.

Por citar un ejemplo: la turbulencia homogénea que se produce a veces a temperaturas por encima de un grado. Schwarz ha desarrollado un conjunto de reglas que permiten un cálculo rápido de las propiedades del sistema y ha encontrado que, en muchos casos, se pueden despreciar las complicaciones de la mecánica cuántica y ceñirse a las leyes de la hidrodinámica clásica. Cuando la velocidad del contraflujo cae, en estas simulaciones, por debajo de cierto valor, la tensión interna de los filamentos de vórtice estira los núcleos de los vórtices, formando líneas rectas que se desplazan a un lado del canal. Quizá sea éste el mecanismo subyacente a la observación experimental según la cual la turbulencia desaparece súbitamente cuando el flujo de calor de un canal se reduce por debajo de cierto valor crítico. Otros resultados recientes sugieren que las interacciones entre los vórtices y las rugosidades microscópicas de las paredes del canal pueden ser también decisivas en la aparición y desaparición de la turbulencia cuántica a velocidades de contraflujo críticas. Se sabe que tales rugosidades superficiales desempeñan un papel principal en la aparición de la turbulencia en los sistemas clásicos.

En ciertas partes de estas simulaciones, Schwarz ha encontrado que no basta con apoyarse exclusivamente en las leyes de la hidrodinámica clásica. Por ejemplo, cuando dos líneas de vórtice se aproximan mucho entre sí, falla la hidrodinámica clásica y hay que recurrir a la mecánica cuántica. Para este caso, Schwarz ha adoptado una regla propuesta hace muchos años por Feynman: cada línea se desdobla en dos en el punto de máxima aproximación y las líneas se conectan de nuevo, pero de una manera diferente: los extremos de cada línea se juntan con los extremos correspondientes de la otra [*véase la figura 8*]. Cuando se añaden estas reconexiones a las simulaciones, casi todas las distribuciones iniciales de vórtices pueden evolucionar rápidamente hacia un embrollo complejo.

¿En qué mecanismo físico puede basarse la reconexión? En hidrodinámica clásica, no es posible que un remolino se rompa por la mitad. Una primera pista puede estar en el reciente trabajo de Christopher Jones, de la Universidad de Newcastle upon Tyne, y Paul Roberts, de la Universidad de California en Los Angeles. Jones y Roberts han examinado la descripción matemática de un anillo de vórtice —una línea de vórtice formando un bucle sencillo— que se reduce hasta casi llegar al tamaño de un núcleo de vórtice. ¿Qué han encontrado? A cierto tamaño definido, la circulación cuantificada en torno a la línea de vórtice desaparece por completo. Quizás una secuencia similar de sucesos ocurra cuando dos trozos de líneas de vórtice distintas se acercan lo suficiente; por razones mecánico-cuánticas la circulación se detiene en una zona limitada, permitiendo que las líneas se unan de nuevo, sin violación alguna de las leyes de la hidrodinámica.

Mirando hacia el futuro, se puede adivinar un firme avance en el estudio de la turbulencia superfluida. Aunque no existen pruebas experimentales que permitan determinar las propiedades del flujo cerca del núcleo de un vórtice, parece ya posible simular de una manera numérica y fiable el flujo. Algunas cuestiones —la del mecanismo que rige la reconexión, por ejemplo— sólo pueden abordarse en el dominio de la teoría, pero también aquí se progresa.

Si todo funciona razonablemente bien, no transcurrirá mucho tiempo sin que entremos en el camino que nos lleve a la comprensión de la turbulencia superfluida, es decir, a la predicción de resultados de experimentos, todavía por realizar, mediante cálculos (y quizá parcialmente mediante simulaciones) que se basen exclusivamente en las leyes fundamentales de la dinámica de los vórtices. La turbulencia superfluida puede convertirse en el primer capítulo de los flujos turbulentos que se aborde con semejante profundidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENERATION OF SUPERFLUID TURBULENCE DEDUCED FROM SIMPLE DYNAMICAL RULES. K. W. Schwarz en *Physical Review Letters*, vol. 49, n.º 4, págs. 283-285; 26 de julio de 1982.

QUANTUM TURBULENCE. Russell J. Donnelly y Charles E. Swanson en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 173, págs. 387-429; 1986.

SUPERFLUID TURBULENCE. J. T. Tough en *Progress in Low Temperature Physics*, vol. 8, págs. 133-216; 1987.

THREE-DIMENSIONAL VORTEX DYNAMICS IN SUPERFLUID ^{4}HE: HOMOGENEOUS SUPERFLUID TURBULENCE. K. W. Schwarz en *Physical Review B*, vol. 38, n.º 4, págs. 2398-2417; 1 de agosto de 1988.

Fibras ópticas de infrarrojos

Nuevos vidrios y fibras cristalinas, más transparentes y capaces de transmitir longitudes de onda mayores que las fibras de sílice, se han aplicado al dominio de las comunicaciones, diagnóstico médico y láseres de fibra óptica

Martin G. Drexhage y Cornelius T. Moynihan

Hace 3000 años, los vidrieros egipcios fabricaron un pez de vidrio opaco con cabeza azul, escamas blancas y aletas amarillas. La adición intencionada de óxidos metálicos al vidrio de sílice —cobalto para el azul, estaño para el blanco y antimonio para el amarillo— proporcionaba los colores del pez. Sin embargo, debido a que las materias primas utilizadas ya contenían trazas de estas impurezas metálicas y de otras, los antiguos egipcios fueron incapaces de obtener vidrio incoloro. A medida que la ciencia química fue avanzando, y gracias al desarrollo de nuevas técnicas de fabricación del vidrio, otros artesanos consiguieron crear vidrios transparentes. Por mor de comparación, diremos que las mejores lentes de que se disponía a principios del siglo XX eran 10.000 veces más transparentes que los vidrios fabricados en el antiguo Egipto. Desde 1960, la transparencia de los vidrios ha aumentado otras 10.000 veces, gracias a una nueva técnica de refino utilizada en la producción de dióxido de silicio puro, una técnica que posibilita fabricar fibras ópticas. Hoy, las conversaciones telefónicas, los datos de los ordenadores y las imágenes de televisión se transmiten, en forma de impulsos luminosos, a través de fibras de vidrios, muy transparentes, basados en el sílice.

En 1979, las fibras ópticas de sílice y vidrios basados en la sílice alcanzaron los límites de transparencia. Estamos asistiendo al nacimiento de una segunda generación de materiales de fibras. Estos materiales son capaces de transmitir luz infrarroja, cuya longitud de onda es mayor que la de la luz visible. Tales fibras pertenecen a tres clases de materiales: los cristales que contienen un haluro, los vidrios calcogénidos y los vidrios de fluoruro de un metal pesado.

La transparencia de todos estos materiales ópticos de infrarrojos promete ser mayor que la que se alcanza con fibras de sílice. De ahí que se estén ensayando en muchas aplicaciones nuevas. Las fibras ópticas de infrarrojos pueden transmitir imágenes de infrarrojos sencillas o información sobre las temperaturas de objetos situados en lugares remotos. Estas fibras pueden servir como conductos flexibles para el paso de la energía producida por los láseres, que puede utilizarse para cortar, soldar o taladrar determinados componentes industriales. Las fibras han servido incluso para transportar la energía producida por un láser de infrarrojos y desprender los depósitos formados en las arterias de los animales, un procedimiento que se puede convertir muy pronto en una alternativa rutinaria a la cirugía de desviación coronaria y de la angioplastia con catéter.

Las aplicaciones de las fibras ópticas de infrarrojos han despertado también un gran interés en la industria de las telecomunicaciones. Si se puede alcanzar el límite de transparencia de las fibras de infrarrojos, éstas tendrán una ventaja clara sobre las fibras ópticas que trabajan con longitudes de onda más cortas. Cuando una fuente luminosa envía una señal a través de una fibra hasta un receptor, una parte de la potencia de la señal que emite la fuente se disipa antes de llegar al receptor. La señal en cuestión puede atenuarse hasta perderse totalmente, si cae por debajo del límite de sensibilidad del receptor. Las señales que recorren grandes distancias necesitan amplificarse periódicamente mediante regeneradores; la fabricación, funcionamiento y mantenimiento de dichos regeneradores representan un gasto importante. Las señales transmitidas a través de fibras de sílice comerciales deben reamplificarse entre cada 10 y 50 kilómetros; para señales transmitidas a través de cables de cobre, dicha reamplificación tiene lugar cada cuatro u ocho kilómetros. Por otra parte, en los sistemas de telecomunicaciones basados en las fibras ópticas de infrarrojos, la distancia entre los regeneradores podría ser de cientos si no miles de kilómetros.

Para alcanzar este objetivo y desarrollar nuevas tecnologías de fibras de pequeñas distancias, los investigadores han estudiado numerosos vidrios y cristales transparentes a los infrarrojos. Tras una detenida consideración de la estructura básica y las fuerzas interatómicas que guían y atenúan la luz a través de una fibra, los candidatos más adecuados resultaron ser los cristales que contienen haluros, los vidrios calcogénidos y los vidrios de fluoruros de metales pesados.

El viaje de todas las ondas luminosas a través de una fibra óptica se inicia en una fuente, que suele ser un láser o un diodo emisor de luz. La fuente se coloca junto a uno de los extremos de la fibra. Consta ésta de dos cilindros concéntricos: el núcleo y el recubrimiento. La luz emitida por la fuente

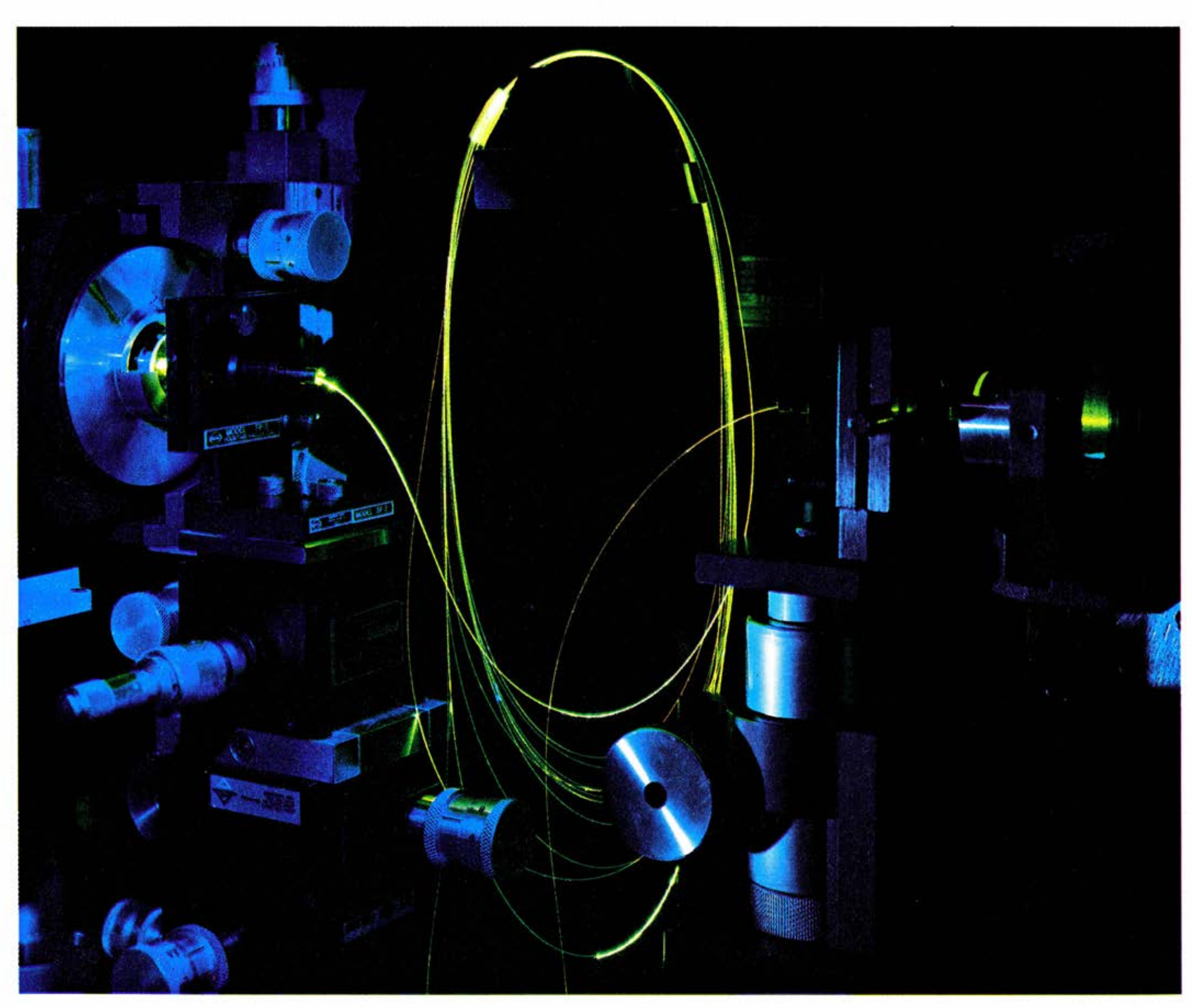
MARTIN G. DREXHAGE y CORNELIUS T. MOYNIHAN han colaborado en muchos proyectos de investigación. Drexhage dirige un equipo que estudia las posibles aplicaciones de los materiales transparentes a los infrarrojos en la Empresa Electroóptica Galileo, en Sturbridge, Massachusetts. Nacido en Alemania, en 1977 recibió su título de doctor por la Universidad Católica de América. De 1977 a 1987, Drexhage trabajó para el directorio de ciencias del estado sólido en la base de las Fuerzas Aéreas de Hanscom. Moynihan es profesor de ciencia de los materiales en el Instituto Politécnico Rensselaer, donde ayudó a crear el centro para la ciencia y tecnología del vidrio. En 1962 obtuvo su título de doctor por la Universidad de Princeton. Moynihan enseñó en la Universidad estatal de California en Los Angeles desde 1964 hasta 1969 y, a partir de esta fecha y hasta el año 1981, en la Universidad Católica.

ilumina el núcleo. Una parte de esta luz atravesará la fibra a lo largo del eje del núcleo, en tanto que la restante entrará formando cierto ángulo con el mismo y terminará por alcanzar la interfase del núcleo y el recubrimiento. La luz que llegue a esta interfase bajo un ángulo de incidencia elevado atravesará dicha interfase y el recubrimiento, y será absorbida normalmente por un material plástico que reviste toda la fibra para protegerla contra el deterioro mecánico. La luz que llega a la interfase bajo ángulos de incidencia pequeños se reflejará totalmente y volverá al núcleo. Este proceso de reflexión total se repite una y otra vez, guiando a los rayos luminosos a lo largo de toda la fibra.

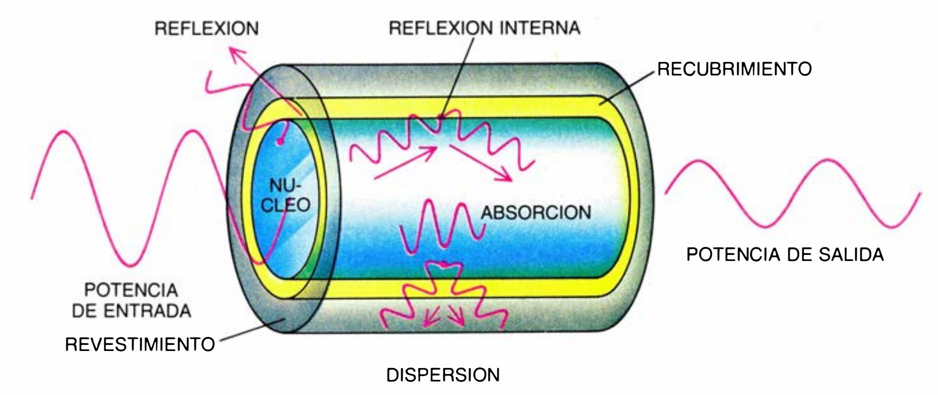
La reflexión total se debe a que la luz y las ondas electromagnéticas se mueven con velocidades diferentes a través de los distintos materiales. La velocidad con que la luz se mueve a través de un material viene representada por el correspondiente índice de refracción: el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (la mayor de todas) y la velocidad de la luz en el material considerado. Por ser la velocidad de la luz, en el núcleo de la fibra, menor que en su recubrimiento, el índice de refracción del núcleo resulta ser mayor. Siempre que la luz se mueve desde un material de índice de refracción elevado hacia otro de índice de refracción bajo, una parte de ella se refleja y la otra se transmite. La fracción de luz reflejada depende del ángulo de incidencia y de la diferencia entre los índices de refracción de los dos materiales.

Ajustando cuidadosamente la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el recubrimiento y controlando el diámetro del núcleo, se puede reforzar el efecto de guía, de forma tal que las señales luminosas se mantengan focalizadas y que todas las componentes de las señales lleguen al receptor simultáneamente. Si todo va bien, parte de la luz emitida por la fuente emerge por el otro extremo del núcleo de la fibra e ilumina un receptor, que suele ser un detector fotosensible depositado sobre una placa de circuito.

Incluso en el caso de que la luz haya entrado en la fibra y se guíe a lo largo del núcleo, la difusión interna y la absorción pueden impedir la propagación y atenuar la señal. La atenuación



1. LASER DE FIBRA OPTICA DE FLUORUROS: una aplicación importante de la técnica de fibras ópticas de infrarrojos. Este dispositivo convierte la luz de un láser del verde azulado al infrarrojo. Se coloca un trozo de fibra arrollada, fabricada de un vidrio de fluoruro de metal pesado contaminado con neodimio, entre dos espejos (*estructuras cilíndricas a la izquierda y a la derecha de la figura*). La luz verde azulada estimula los iones de neodimio y éstos emiten radiación infrarroja. La luz infrarroja se amplifica al atravesar repetidamente la porción de fibra y reflejarse en los dos espejos. Uno de los espejos, parcialmente transparente, deja que escape parte de la radiación infrarroja. William J. Miniscalo, Leonard Andrews y Barbara Thompson ensamblaron este dispositivo.



2. ATENUACION de una fibra óptica. Esta pérdida de potencia se produce por varios procesos. Una fibra está constituida por un núcleo que conduce la luz y un recubrimiento que devuelve al núcleo la mayor parte de la luz errante que tiende a escapar de él. Otra parte de la luz atraviesa el recubrimiento y resulta absorbida por el revestimiento externo; finalmente, otra parte se pierde al entrar, por reflexión en el extremo de la fibra. En el interior del núcleo, los átomos del material y las impurezas absorben luz. Como consecuencia de las fluctuaciones microscópicas en la composición de la fibra y en su densidad, parte de la luz se dispersa.

de la luz en un sólido transparente es el resultado de tres procesos independientes: la absorción electrónica, la difusión luminosa y la absorción vibratoria. Aunque la magnitud de estos procesos puede variar con el material, los tres fenómenos se producen en todos los sólidos transparentes.

La absorción electrónica es responsable de la atenuación para longitudes de onda pequeñas. Después de todo, una fibra está compuesta por átomos unidos entre sí por los electrones que forman sus enlaces químicos. Cuando una onda luminosa de energía adecuada entra en la fibra, puede ser absorbida por los electrones de enlace y disiparse subsiguientemente en forma de calor. Ahora bien, las longitudes de onda cortas corresponden a energías elevadas de los enlaces químicos; por tanto, la luz de longitud de onda corta se absorbe más fuertemente mediante este mecanismo que la luz de longitud de onda larga.

La difusión luminosa gobierna la atenuación para longitudes de onda mayores. Una forma corriente de difusión luminosa intrínseca es la difusión de Rayleigh, un fenómeno que tiene lugar en los líquidos, en los gases y en muchos sólidos, entre ellos, los vidrios. La difusión es una consecuencia de las variaciones locales del índice de refracción del material producidas por cambios en su densidad y composición. La intensidad de la difusión disminuye rápidamente al aumentar la longitud de onda y su magnitud depende del material. Los experimentos realizados en muchos vidrios basados en la sílice sugieren que el índice de refracción y la temperatura de transición del vidrio son dos de los parámetros más importantes que determinan la atenuación debida a la difusión de Rayleigh. La temperatura de transición marca el punto para el cual el vidrio fundido solidifica, congelándose en variaciones localizadas del índice de refracción del material. La difusión de Rayleigh resulta poco importante en aquellos materiales en los que las temperaturas de transición son bajas y, pequeños, los índices de refracción.

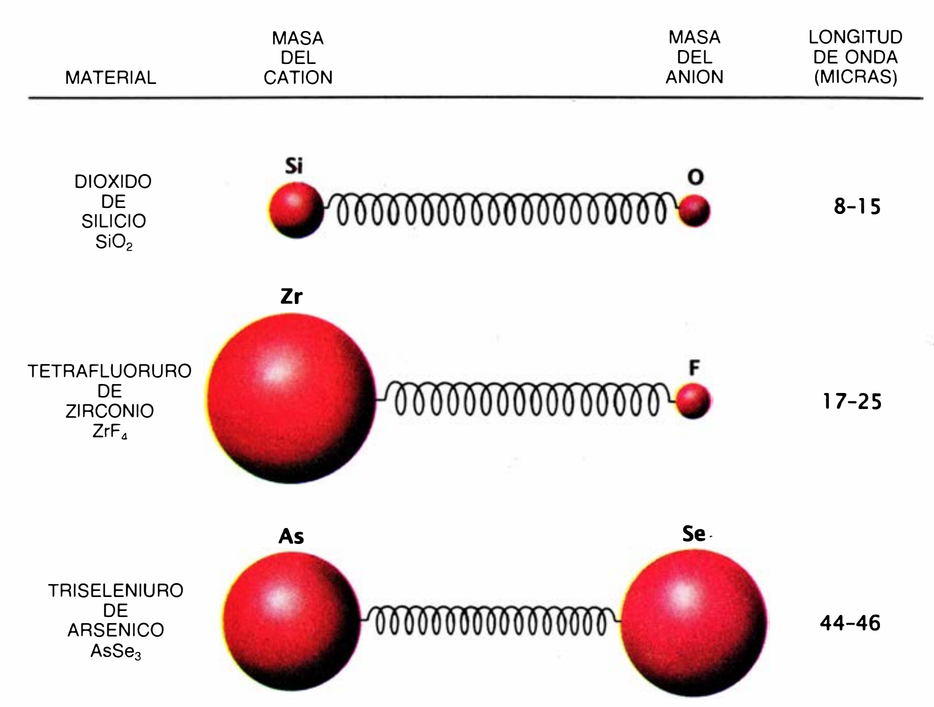
La absorción vibratoria rige la atenuación para longitudes de onda más largas. Este fenómeno es una función complicada de las cargas efectivas, las masas y los tamaños de los átomos que constituyen un sólido. Los enlaces entre los átomos de un cristal o de un vidrio se deben a la atracción existente entre los iones cargados positivamente (cationes) y los iones cargados negativamente (aniones). Dos iones unidos por un enlace químico vibran continuamente, como lo harían dos masas unidas mediante un muelle rígido. Si estas masas se desplazan en virtud de una fuerza periódica cuyo período de vibración coincida con el de las masas, se transferirá energía a dichas masas y aumentará la amplitud de las vibraciones. Este efecto se conoce con el nombre de resonancia. Si los enlaces atómicos se desplazan por acción de la luz a ciertas longitudes de onda de resonancia, la energía luminosa se convierte en energía vibratoria de los iones. La intensidad de la señal disminuye porque se absorbe la energía. Cuando la longitud de onda se hace menor que la longitud de onda de resonancia, la absorción vibratoria disminuye y el material adquiere mayor transparencia.

ULTRA-VIOLETA
VISIBLE
INFRARROJO
ABSORCION ELECTRONICA
ABSORCION VIBRATORIA
ATENUACION
ATENUACION MINIMA
DISPERSION DE RAYLEIGH
LONGITUD DE ONDA

3. ATENUACION INTRINSECA de la luz. Este efecto resulta de tres procesos diferentes en los materiales que constituyen la fibra. La absorción electrónica consume energía cuando la luz de longitud de onda corta excita los electrones de enlace de los átomos. La absorción vibratoria tiene lugar cuando la luz de longitud de onda larga hace que los átomos de un material vibren. Para longitudes de onda intermedias, donde ninguno de estos dos mecanismos de absorción es importante, las fluctuaciones de la densidad o de la composición del material dan lugar a la difusión de Rayleigh. Estos mecanismos determinan la curva de atenuación.

La longitud de onda resonante viene determinada por la intensidad del enlace y la masa de los iones. La longitud de onda resonante tiende a disminuir cuando la masa del par iónico es pequeña e intenso el enlace interatómico. Por ejemplo, en el dióxido de silicio, cada catión de silicio está rodeado por cuatro aniones de oxígeno. El silicio está ligado fuertemente al oxígeno y la masa conjunta de los dos iones es pequeña en comparación con la de los iones de otras fibras ópticas de infrarrojos. En consecuencia, para las longitudes de onda más cortas de la región del infrarrojo se produce una absorción importante y el dióxido de silicio sólo puede transmitir este tipo de radiación a una longitud de onda de 2,5 micras.

En la disposición atómica desordenada que caracteriza a los vidrios, e incluso en las redes bien ordenadas de los cristales, la aparición de la absorción vibratoria se produce de forma gradual, a medida que nos acercamos a la longitud de onda resonante. Este hecho da lugar al límite de absorción vibratoria del material. En esta región, la intensidad de la absorción en muchas sustancias disminuye exponencialmente con la longitud de onda.



4. **MATERIALES VITREOS y absorción de la luz a través de las vibraciones atómicas. La masa atómica y la intensidad de los enlaces determinan la longitud de onda para la cual la absorción vibratoria se hace máxima. Las masas grandes y los enlaces débiles entre los iones aumentan esta longitud de onda. En consecuencia, el tetrafluoruro de circonio, componente principal de los vidrios de fluoruros de metales pesados, y el triseleniuro de arsénico, un calcogénido, atenúan las señales con especial intensidad en la región del infrarrojo lejano. Los iones de silicio y oxígeno poseen una masa menor y su enlace es más fuerte; por esta razón, el dióxido de silicio atenúa las señales con más intensidad en la región del infrarrojo próximo.**

La absorción electrónica, la difusión de Rayleigh y la absorción vibratoria se consideran otras tantas formas intrínsecas de pérdida, debido a que todas ellas son inherentes al material. El conocimiento de las propiedades intrínsecas nos permite avanzar cuál será la transparencia máxima que se puede alcanzar en un sólido. En la elección de los materiales adecuados cuentan también las pérdidas extrínsecas, que son el resultado de la presencia de contaminantes y de un proceso de fabricación inadecuado. Entre los factores extrínsecos se incluyen la absorción debida a las impurezas del material, la difusión de la luz producida por partículas de gran tamaño o por burbujas, la variabilidad en el diámetro de la fibra y las desviaciones localizadas del índice de refracción deseado.

La pérdida de potencia total debida a las fuentes intrínsecas y extrínsecas se representa mediante un coeficiente de atenuación, expresado en decibelios por kilómetro. Supongamos que una fibra tiene una atenuación de un decibelio por kilómetro; cuando se inyectan 10 watt de energía óptica en una fibra de un kilómetro de longitud, emergerán 7,9 watt. El vidrio ordinario tiene una atenuación de varios miles de decibelios por kilómetro. Los sistemas de comunicaciones ópticas requieren que las pérdidas se mantengan a niveles del orden de un decibelio por kilómetro en una fibra de 50 kilómetros de longitud; si la longitud de los enlaces es todavía mayor, las pérdidas deben reducirse a 0,01 decibelios por kilómetro. Si el vidrio de ventanas tuviera esta transparencia, se podría mirar a través de un panel de 200 kilómetros de espesor.

Además de la baja atenuación óptica, deben tomarse en consideración otras muchas características del material con el que se fabrican las fibras. El material de fibras ideal debería ser fuerte, flexible, fácil de fabricar e inmune a la corrosión. Desgraciadamente, una atenuación baja y unas buenas características estructurales tienden a ser incompatibles. Muchas de las propiedades que favorecen la transparencia para longitudes de onda altas —tales como la temperatura de transición del vidrio, los enlaces interatómicos débiles, los aniones más pesados que el oxígeno— producen frecuentemente materiales con propiedades físicas, químicas y mecánicas indeseables. Hay, sin embargo, materiales cristalinos y vítreos, con una elevada transparencia a las longitudes de onda altas, para los que estas cualidades son aceptables. Estos materiales pueden transmitir longitudes de ondas del infrarrojo con una difusión de Rayleigh y una absorción electrónica pequeñas. Por tanto, y en teoría, se puede reforzar su transparencia hasta niveles superiores a los que caracterizan las fibras de sílice.

Con todo, la atenuación más baja que se ha alcanzado en la actualidad es del orden de 0,2 decibelios por kilómetro, a una longitud de onda de 1,5 micras. Este valor coincide bastante bien con el límite de transparencia intrínseco predicho para los vidrios de sílice, habida cuenta de la difusión de Rayleigh, la absorción electrónica y el límite de absorción vibratoria asociados con el enlace silicio-oxígeno. Esta baja atenuación se consiguió gracias a un proceso de fabricación muy cuidadoso, del vidrio y de la fibra, con el fin de eliminar todas las fuentes de pérdidas extrínsecas.

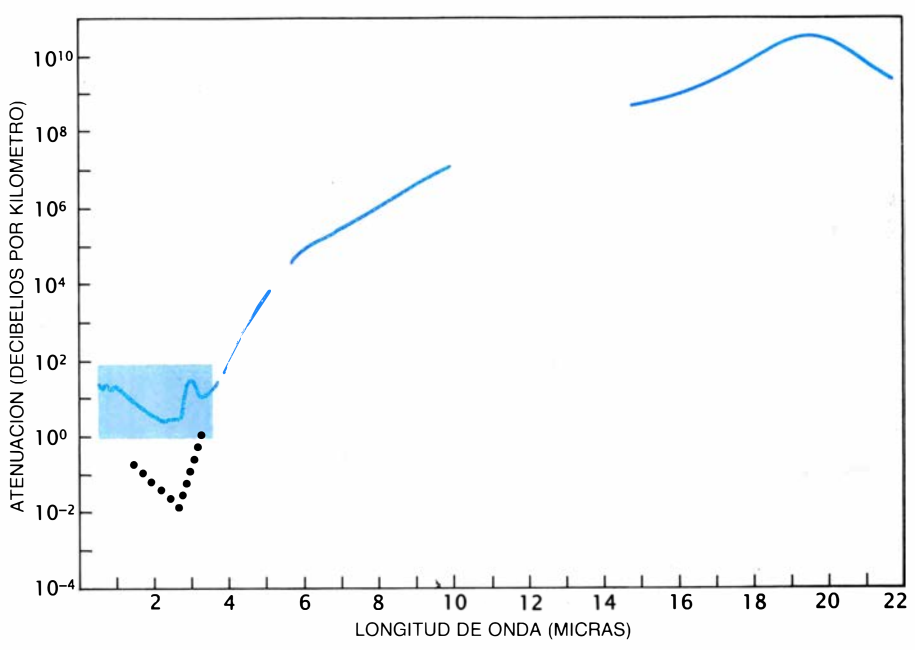
Para obtener transparencias todavía mayores que las que se pueden conseguir en las fibras basadas en la sílice, los nuevos materiales —escogidos en función de sus propiedades de atenuación intrínsecas— deben someterse a un proceso de refinado, que reduzca al mínimo los factores de atenuación extrínsecos. Estos nuevos materiales trabajarán en una región del infrarrojo situada por encima de las dos micras.

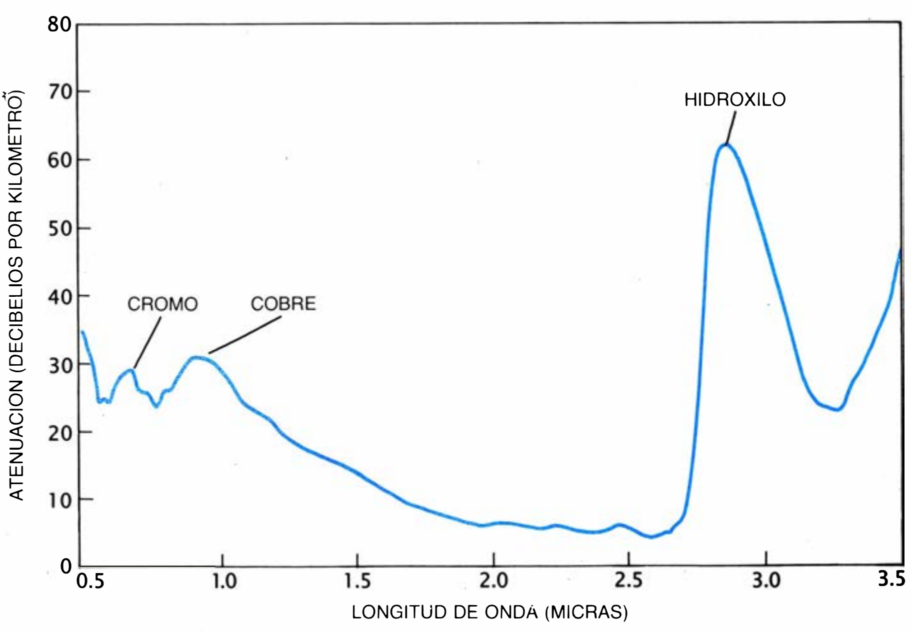
Los materiales cristalinos forman la primera clase de sustancias que pueden convertirse en eficaces fibras ópticas del infrarrojo. En teoría, existen muchos cristales con dos componentes —el bromuro de plata, el seleniuro de cinc, el zafiro e incluso el cloruro de sodio— con una atenuación intrínseca pequeña. Sin embargo, en la práctica, la utilización de monocristales como fibras ópticas de gran longitud plantea diversos problemas. Las velocidades de crecimiento de las fibras de un solo cristal son bastante pequeñas, frecuentemente de tan sólo algunos centímetros por minuto. Esta baja velocidad de crecimiento aumenta la probabilidad de que el diámetro de la fibra varíe. La fabricación simultánea de una estructura de verdadera fibra óptica, con un núcleo de índice de refracción elevado y un revestimiento de índice más bajo, resulta también difícil.

Los materiales policristalinos, principalmente los basados en los haluros de talio o de plata, son mucho más prometedores. Se ha estudiado detenidamente una fibra compuesta de talio, bromo y iodo. El elevado índice de refracción del cristal de haluro de talio (del orden de 2,7) sugiere que la difusión de Rayleigh de este material debe ser importante. Sin embargo, su límite vibratorio en la región del infrarrojo lejano nos permite utilizar luz con una longitud de onda tal que la difusión de Rayleigh sea poco importante. En teoría, se pueden fabricar monocristales de haluro de talio con un factor de atenuación menor que 0,01 decibelios por kilómetro para longitudes de onda de unas siete micras. Sin embargo, dicho material forma, en el proceso de fabricación, una microestructura granular y policristalina que difunde la luz. Estos efectos de difusión extrínsecos, junto con la absorción que producen las impurezas, han limitado la atenuación de las fibras de haluro de talio policristalino a un valor entre 150 y 400 decibelios por kilómetro. Sin embargo, este moderado nivel de atenuación se mantiene para un amplio intervalo de longitudes de onda que se extiende desde las seis hasta las quince micras.

El haluro de plata es un material policristalino constituido por plata, bromo y cloro. Abraham Katzir, de la Universidad de Tel-Aviv, ha fabricado fibras con atenuaciones por debajo de los 1000 decibelios por kilómetro para longitudes de onda superiores a seis micras. Lo mismo que sucede con los haluros de talio, las fibras de haluro de plata son capaces de transmitir la luz procedente de un láser de dióxido de carbono para una longitud de onda de 10,6 micras. En consecuencia, este material resulta indicado para toda una serie de aplicaciones de trasmisión de potencia con un láser, entre las que podemos citar la intervención quirúrgica asistida por láser.

Los vidrios calcogénidos, la segunda clase de materiales de fibras ópticas transparentes al infrarrojo, se fabrican combinando ciertos metales con los elementos más pesados de la familia del oxígeno, es decir, los elementos calcógenos: azufre, selenio y teluro. El trisulfuro de arsénico y el triseleniuro de arsénico resumen las propiedades de





5. LOS VIDRIOS DE FLUORUROS DE METALES PESADOS se muestran muy prometedores como materiales de transmisión para fibras ópticas con pérdida baja. La curva discontinua (*figura de arriba*) representa las mediciones de atenuación de un vidrio de fluoruro en cuatro regiones de longitudes de onda diferentes. Las muestras presentaban una atenuación mínima de 4,3 decibelios por kilómetro. La curva de puntos predice que la atenuación mínima alcanzable es del orden de 0,1 decibelios por kilómetro. La disparidad entre la predicción y los resultados de las medidas se debe a la absorción extrínseca y a la dispersión. La curva continua (*figura de abajo*) muestra la región de baja atenuación de una fibra preparada por Paul W. France en los laboratorios Telecom. En las proximidades de 1 micra, se produce cierta pérdida por la absorción electrónica de los contaminantes metálicos. Los dos picos de la atenuación se atribuyen al cobre y al cromo que, con otras impurezas metálicas, se encuentran presentes en el vidrio en cantidades del orden de 85 partes por mil millones. Los iones hidroxilo (que se introducen en forma de humedad durante el proceso de fabricación) absorben fuertemente la luz para longitudes de onda del orden de tres micras. Una concentración de iones hidroxilo de una parte en un millón atenuaría la señal en 10.000 decibelios por kilómetro.

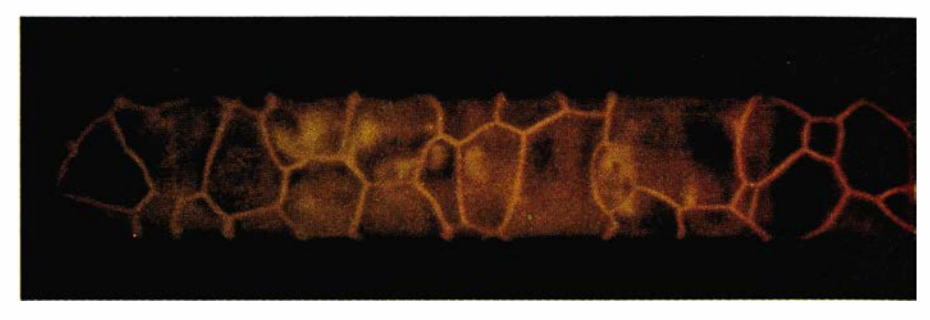
los vidrios calcogénidos. La absorción electrónica del trisulfuro de arsénico se sitúa en el centro del espectro visible, mientras que la del triseleniuro de arsénico se sitúa en el infrarrojo próximo. En consecuencia, el vidrio de trisulfuro de arsénico es de color rojo y el vidrio de triseleniuro de arsénico es negro opaco.

Estos materiales poseen un índice de refracción bastante elevado (entre 2,4 y 2,7) y sus temperaturas de transición del vidrio son bajas (entre 150 y 175 grados Celsius); así pues, muestran una baja difusión de Rayleigh. El trisulfuro de arsénico es transparante para longitudes de onda de unas 10 micras, mientras que el vidrio basado en el selenio, cuyo peso atómico es más del doble que el del azufre, transmite radiación para longitudes de onda de unas 14 micras.

A diferencia de los materiales mono o policristalinos, los vidrios calcogénidos permiten fabricar con facilidad fibras ópticas con el núcleo y el revestimiento adecuados y de varios kilómetros de longitud. Entre las mejores fibras calcogénidas producidas hasta la actualidad, cabe citar las preparadas con trisulfuro de arsénico por Terutoshi Kanamori de la Empresa Pública de Teléfonos y Telégrafos del Japón. A una longitud de onda de 2,4 micras, se ha obtenido una atenuación mínima de 35 decibelios por kilómetro, aunque el límite intrínseco previsto para estas fibras sea de 0,1 decibelios por kilómetro para una longitud de onda de cinco micras. Gran parte de esta pérdida está originada por la contaminación de moléculas de agua y otras impurezas portadoras de hidrógeno.

Un problema más serio que afecta a las fibras calcogénidas es el de la posible existencia de una fuerte absorción electrónica intrínseca en el infrarrojo, debida a defectos en la estructura del vidrio, que puede limitar la atenuación mínima alcanzable a los 10 decibelios por kilómetro.

El interés actual por las fibras calcogénidas se debe, en gran parte, a su capacidad para transmitir luz infrarroja con longitudes de onda de 6 a 12 micras a una distancia de algunos metros. Peter Prideaux, de la Empresa Electroóptica Galileo (uno de nuestros laboratorios), ha fabricado fibras calcogénidas, cientos de las cuales se pueden reunir para fabricar un manojo flexible de fibras ópticas capaz de transmitir imágenes sencillas para longitudes de onda del infrarrojo o información sobre la temperatura de un objeto. La intensidad de la luz infrarroja emitida por un objeto aumenta a medida que lo hace su temperatura. Las fibras pueden guiar la luz hasta un detector, permitiendo llevar a cabo la termometría desde lugares alejados. Los gases, líquidos o reacciones químicas que absorben o emiten luz infrarroja podrían controlarse desde una sala central de una factoría utilizando una red de dichas fibras.



6. MICROESTRUCTURAS GRANULARES de los cristales de haluro de talio; dispersan una fracción elevada de la luz que se propaga a lo largo de la fibra. En consecuencia, las fibras de este material muestran atenuaciones unas 1000 veces mayores que las fibras de sílice, aun cuando la transparencia de los monocristales de haluro de talio sea teóricamente mayor. Las fibras de haluro de talio pueden transmitir la energía de los láseres para aplicaciones quirúrgicas. Esta fibra, con un diámetro de 75 micras, fue construida por James A. Harrington, que en aquel entonces trabajaba en los laboratorios de investigación Hughes.

La tercera clase de materiales de fibras de infrarrojos consiste en los vidrios de fluoruros de metales pesados. Michel Poulain, de la Universidad de Rennes, en Francia, descubrió por casualidad el primer miembro de esta familia de materiales en el año 1974. Durante la preparación de la tesis doctoral, Poulain pretendía fundir un compuesto cristalino constituido por una mezcla de fluoruros de circonio, bario, sodio y neodimio. Cuando enfrió dicha muestra, advirtió la presencia de grandes fragmentos transparentes. Aunque en un principio pensó que se trataba de cristales, se demostró más tarde que eran vidrios. Michel Poulain, Marcel Poulain (su hermano) y Jacques Lucas descubrieron gran número de nuevas clases de vidrios. Todos estos materiales se denominan actualmente vidrios de fluoruros de metales pesados.

En principio, se puede incorporar cualquier metal del sistema periódico a un vidrio de fluoruro de metal pesado. Sin embargo, desde el punto de vista de la transparencia a los infrarrojos y la facilidad de fabricación de los vidrios, sólo han merecido un estudio detenido algunas composiciones: el fluorcirconato, el fluorhafnato y los vidrios de bario y torio.

Las medidas de las características de transmisión de los vidrios de fluoruros de metales pesados ponen de manifiesto la existencia de transparencias muy elevadas para un intervalo muy amplio de longitudes de onda, concretamente la región comprendida entre 0,3 y 8 micras. Estos materiales poseen unas temperaturas de transición del vidrio moderadas (del orden de 300 grados centígrados) y sus índices de refracción son parecidos al de la sílice (1,5). La existencia de un límite vibratorio para rayos infrarrojos de longitud de onda larga y una difusión de Rayleigh pequeña sugieren que las atenuaciones intrínsecas de los vidrios de fluoruros de metales pesados pueden llegar a ser del orden de 0,01 decibelios por kilómetro.

Por esta razón, se ha estudiado intensamente tales materiales pensando en su aprovechamiento para los sistemas de comunicación mediante fibras de pérdida baja en Estados Unidos, Reino Unido y Japón. El Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos y la Empresa Pública de Teléfonos y Telégrafos del Japón han fabricado fibras de fluoruros de siete a treinta metros de longitud y con una atenuación de entre 0,7 a 0,9 decibelios por kilómetro para longitudes de onda de 2,5 micras. Estas transparencias son muy superiores a las que muestran otros materiales de fibras de infrarrojos. A pesar de todo, estos valores septuplican las atenuaciones de las mejores fibras de sílice y están aún muy lejos del límite intrínseco de las fibras de fluoruros.

Nos podemos acercar a este límite identificando las fuentes de las pérdidas extrínsecas en las fibras y controlándolas. La realización de experimentos cuidadosos de difusión luminosa y atenuación ha puesto de manifiesto ya algunas de las causas de estas pérdidas extrínsecas. Para longitudes de onda de entre 0,5 y 2 micras, una parte al menos de la atenuación se debe a la absorción electrónica producida

por pequeñas cantidades de impurezas de cobre, cromo, níquel y hierro. Por ejemplo, una contaminación por hierro de tan sólo una parte en un millón puede producir una atenuación de 15 decibelios por kilómetro para una longitud de onda de unas 2,5 micras. Los grupos hidroxilo, que se introducen en la fibra bajo la forma de humedad en los materiales de partida o durante el proceso de fusión del vidrio, originan una atenuación muy fuerte de la luz infrarroja. Las estimaciones demuestran que una parte por millón de hidroxilo produce una atenuación de unos 10.000 decibelios por kilómetro para una longitud de onda de 2,9 micras. Aunque se han registrado avances significativos en el proceso de refino de los productos químicos que se funden para fabricar el vidrio, la difusión extrínseca originada por la presencia de pequeños cristales y burbujas sigue constituyendo un problema muy serio en las fibras de fluoruros.

Incluso para los niveles ordinarios de transparencia, los vidrios de fluoruros de metales pesados presentan buenas posibilidades técnicas. Dieter Pruss, de la empresa Dragerwerk AG de la República Federal de Alemania, ha utilizado fibras de fluoruros para controlar la entrada de los gases de anestesia en los pacientes durante las operaciones quirúrgicas. Estos gases ofrecen unas bandas de absorción características en el infrarrojo; tales bandas se pueden transmitir a través de la fibra y detectarse. De este modo, la concentración del gas de anestesia se puede observar con gran precisión cada vez que el paciente respira.

En la mayoría de las aplicaciones, las fibras ópticas de infrarrojos se utilizan sencillamente para transmitir luz de un punto a otro. El material se puede usar también para fabricar fibras especiales, capaces de alterar la amplitud o la longitud de onda de la luz que las atraviesa. Un ejemplo de esta tecnología es el láser de fibra óptica. El núcleo de la fibra está contaminado con pequeñas cantidades de ciertos iones de tierras raras. Una sección de la fibra se coloca entre dos espejos parcialmente reflectores. Cuando un haz de luz láser de una determinada longitud de onda se inyecta en la fibra, los iones de tierras raras se excitan a un estado de energía más alta. Posteriormente, los átomos excitados emiten luz y retornan a un estado de energía más baja; la longitud de onda de esta luz emitida es mayor que la de la luz estimuladora original. Esta luz se amplifica al ser reflejada una y otra vez en los espejos situados en los extremos de la fibra y al viajar repetidamente a lo largo de la fibra. De estos espejos, uno, parcialmente transparente para la luz emitida, permite que parte de la luz escape del dispositivo. La fibra se comporta, pues, como una fuente compacta de luz láser de estado sólido, produciendo una longitud de onda muy diferente de la del láser original. La longitud de onda de la luz emitida se puede controlar cambiando la longitud de onda original y seleccionando las tierras raras utilizadas de contaminantes. Estos dispositivos, preparados a partir de fibras de vidrio de fluoruros de metales pesados, sirven para producir, de forma eficiente, longitudes de onda de láser de infrarrojos imposibles de obtener con fibras basadas en la sílice.

Estamos convencidos de que los vidrios de fluoruros de metales pesados ofrecen las mejores perspectivas para alcanzar unas pérdidas ópticas menores que las que se obtienen actualmente en las fibras de sílice de alta calidad. Para que se pueda llegar a construir estos sistemas de comunicaciones de baja pérdida, será necesario que se produzcan avances significativos en los procesos de refino y fabricación de fibras de fluoruros de metales pesados. Entretanto, las fibras ópticas de infrarrojos con pérdidas del orden de 10 a 100 decibelios por kilómetro se pueden utilizar en ciertos dispositivos de diagnóstico médico, en la transmisión de energía óptica, en la fabricación de sensores remotos y en los láseres de fibras ópticas. A todas esas aplicaciones se les adivina un futuro muy brillante en los próximos años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INFRARED OPTICAL FIBERS. Tadashi Miyashita y Toyotaka Manabe en *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-18, n.º 10, págs. 1432-1450; octubre de 1982.

SPECIAL ISSUE ON LOW-LOSS FIBERS. En [IEEE] *Journal of Lightwave Technology*, vol. LT-2, n.º 5; octubre de 1984.

THE SEARCH FOR VERY LOW LOSS FIBER-OPTIC MATERIALS. M. E. Lines en *Science*, vol. 226, n.º 4675, págs. 663-668; 9 de noviembre de 1984.

HEAVY METAL FLUORIDE GLASSES. Martin G. Drexhage en *Treatise on Materials Science and Technology*, vol. 26, págs. 151-243; 1985.

HALIDE GLASSES. Cornelius T. Moynihan en *Materials Research Society Bulletin*, vol. 12, n.º 5, págs. 40-44; 16 de junio de 1987.

Evolución de la marcha humana

Los rasgos de la pelvis muestran que Lucy, un homínido que vivió hace tres millones de años, caminaba erguida. La bipedia podría remontarse a las fases aurorales de la evolución humana

C. Owen Lovejoy

Si se preguntase cuál es el rasgo distintivo de la especie humana, muchos señalarían nuestro voluminoso cerebro. Otros recordarían nuestra habilidad para construir y utilizar herramientas complejas. Pero existe un tercer rasgo que también nos define y clasifica aparte: nuestra marcha erguida, exclusiva de los seres humanos y de nuestros antepasados inmediatos. Los demás primates suelen ser cuadrúpedos, por una buena razón: caminar sobre dos extremidades, en vez de hacerlo sobre cuatro, tiene muchos inconvenientes. Este modo de andar frena nuestra velocidad, limita nuestra agilidad y casi elimina nuestra capacidad para trepar a los árboles, facultad ésta que permite a los primates conseguir muchos alimentos importantes: frutas y nueces.

La mayoría de los evolucionistas de este siglo han mantenido que los antepasados del hombre desarrollaron tan extraño modo de locomoción porque así les quedaban las manos libres para sostener herramientas que su cerebro desarrollado les permitía construir. Pero el conocimiento del registro fósil humano ha aumentado en los últimos veinte años. Ni la posesión de un cerebro excepcional, ni el uso de útiles líticos parecen evidentes entre nuestros antepasados más antiguos que se conozca: los australopitecinos, que vivieron hace tres millones de años, e incluso antes. Pues bien, esos antepasados del hombre sí muestran claramente muchas de las señales propias de la bipedestación.

¿Cuánto tiempo llevaban los ancestros del hombre caminando erguidos? ¿Estuvo el bipedismo plenamente desarrollado entre los homínidos de hace tres millones de años, o recurrían ocasionalmente al uso de las cuatro extremidades para correr o trepar? Las respuestas pueden ayudar a revelar el misterio del papel desempeñado por la bipedia en los momentos iniciales de la evolución humana. Si la marcha erguida estaba bien establecida en la época de *Australopithecus*, su origen podría remontarse hasta los primeros homínidos, cuyo linaje surgió probablemente de otros primates hace unos ocho o diez millones de años. El desarrollo de la marcha erguida pudo haber constituido un acontecimiento decisivo en el inicio de la evolución humana.

He defendido que la bipedia vino acompañada de un conjunto de adaptaciones en el comportamiento que representaron en sí las innovaciones evolutivas fundamentales de los primeros antepasados del hombre. Estas adaptaciones incluyeron la existencia de una familia nuclear: mantenimiento de la monogamia, junto con el ejercicio del cuidado de la prole a cargo de ambos progenitores. Al macho correspondía aprovisionar a la familia de alimentos altamente energéticos, gracias a los cuales aumentaba la capacidad de la madre para nutrir y proteger a los hijos y, al mismo tiempo, le permitía engendrar más a menudo. La bipedia figura en este nuevo esquema reproductivo, pues, con las manos libres, el macho podía transportar los alimentos que recolectaba lejos de su compañera. Estos progresos debieron alcanzarse mucho antes de que comenzase el registro fósil conocido de los homínidos.

Debía, pues, dominarse la marcha erguida en la época en que vivió un australopitecino hembra cuyo esqueleto fósil se ha convertido en auténtico banco de pruebas para determinar la locomoción primitiva. En 1974 la búsqueda continua de antepasados del hombre en el Triángulo de Afar, Etiopía, dirigida por Donald C. Johanson, del Instituto del Origen del Hombre de Berkeley, fue espléndidamente recompensada con el hallazgo del esqueleto de "Lucy", cuya designación técnica es la de A. L. 288-1. Aunque el esqueleto no está entero, conserva más detalles que cualquier otro fósil equiparable. Incluye, en particular, muchos huesos de las extremidades inferiores, uno de los dos huesos innominados que, como en un par de imágenes especulares, forman la pelvis de los primates y un sacro completo (la vértebra soldada en la parte posterior de la pelvis). La marcha erguida depende tanto de esta estructura que el análisis de la pelvis de Lucy nos revelará hasta qué punto ella y sus contemporáneos estaban capacitados para caminar así.

Los rasgos pélvicos distintivos de un bípedo son reflejo de los mecanismos, muy diferentes, que rigen la locomoción a dos y cuatro extremidades. Con el objeto de impulsarse a sí mismo, cualquier mamífero terrestre debe aplicar una fuerza contra el suelo en sentido opuesto al de la marcha. Esto se consigue extendiendo las articulaciones de las extremidades que se encuentran entre el suelo y el centro de masas del animal. La extensión de una extremidad produce una "reacción del suelo", que impulsa el tronco en una dirección determinada por el ángulo que forma la extremidad con el suelo.

En la postura cuadrúpeda, propia de la mayoría de los primates, el centro de masas se encuentra bastante adelantado con respecto a las extremidades posteriores. Por tanto, la extensión de

C. OWEN LOVEJOY enseña antropología en la Universidad estatal de Kent y anatomía en la facultad de medicina de las universidades de Northeast Ohio. En 1970 se doctoró en antropología física por la de Massachusetts en Amherst. Intervino en la recuperación y análisis del esqueleto de Lucy. Comparte su pasión por los orígenes del hombre con escarceos en la antropología forense por ser asesor de la Oficina del Juez del Condado de Cuyahoga.



1. PELVIS femenina actual (*arriba*) y pelvis de Lucy (*abajo*). Tres millones de años de evolución las separan. Ambas, sin embargo, presentan las mismas señales de marcha erguida. El cambio principal visible en esta perspectiva —la forma más ovoidal de la pelvis humana— estuvo acompañado de una expansión del canal de parto, necesaria ante el aumento del tamaño del cerebro, que se produjo a partir de Lucy. El autor y Barbara Brown han restaurado la pelvis de Lucy a partir de restos fósiles fragmentados; L. Rubens, tomó estas fotografías. La marcha erguida fue decisiva en el camino hacia la evolución humana.

aquéllas genera una reacción del suelo que tiene una gran componente horizontal. Al comienzo de cada ciclo, las articulaciones de la rodilla y la cadera están muy flexionadas en las extremidades posteriores; por eso, su extensión puede ser potente y prolongada.

Nuestra postura erguida, en cambio, sitúa el centro de masas por encima de los pies. Si, erguidos, estiramos las piernas, enderezando las rodillas y elevando los tobillos, la reacción del suelo será en dirección vertical y acabaremos levantándonos sobre la punta de los pies. Con objeto de impulsar nuestro tronco erguido, deberemos recolocar el centro de gravedad delante de una pierna. La pierna retrasada se estira para producir una reacción del suelo, mientras que la otra se adelanta para mantener en equilibrio el tronco. La fuerza de la reacción del suelo es limitada, ya que gran parte de la misma se produce en dirección vertical y, también, porque, en razón de nuestra postura erguida, la pierna retrasada se encuentra ya cerca del límite de extensión: la articulación de la cadera se halla totalmente extendida y, la de la rodilla, casi lo está.

Con la nueva estrategia del bipedismo, la mayoría de las masas musculares de las extremidades inferiores pasan a desempeñar nuevas funciones; estas últimas requerirán, a su vez, cambios sucesivos en la estructura o asentamiento de los músculos y, por tanto, en el diseño de la pelvis. La comparación de la pelvis humana con la de nuestro pariente actual más cercano, el chimpancé, nos pondrá de manifiesto los cambios producidos en el diseño mecánico.

La necesidad de mantener estable un tronco erguido determinó el cambio más drástico de todos los que trajo consigo la adopción de la bipedia: la transformación del glúteo mayor, un músculo bastante pequeño en el chimpancé, en el mayor músculo del cuerpo humano. El glúteo mayor nace en la parte trasera de la pelvis y se aloja en la zona posterior y lateral del fémur superior, o hueso del muslo. De acuerdo con su definición, un extensor de la cadera, y según lo vieron anatomistas clásicos, funciona, en la postura erguida, como el principal músculo propulsor. Se ha supuesto que, al enderezar la cadera, el glúteo mayor contribuye a la reacción del suelo que se transmite a través de la pierna retrasada.

La verdad es que la contribución del músculo a la reacción del suelo es limitada; y ello porque la cadera está casi extendida del todo en la posición inicial que se adopta en la marcha y la carrera erguida. Su hipertrofia en los seres humanos refleja una función distinta. Cuando corremos, la inercia tiende a inclinar nuestro tronco erguido hacia delante a cada zancada. El glúteo mayor cumple la función de evitar la caída de bruces.

La función estabilizadora del músculo ha ganado en operatividad gracias a una importante modificación de la pelvis. Cada hueso innominado está coronado por una cresta ósea, el ílion; la mayoría de las vísceras inferiores se alojan en el espacio existente entre los dos huesos ilíacos. En el chimpancé y otros primates, los ilíacos son mucho más largos que en los seres humanos. Unos huesos ilíacos largos producen un alargamiento del torso; cuando estos primates se incorporan, el centro de masas se sitúa por encima de su cintura pélvica. En lenguaje de ingeniería diríamos que el tronco posee un brazo largo de palanca. Pero un glúteo mayor

2. PELVIS Y EXTREMIDAD de un chimpancé (*izquierda*) y de un ser humano (*derecha*). Reflejan las diferentes demandas de la locomoción cuadrúpeda y bípeda. La musculatura de la pelvis del chimpancé está dominada por el glúteo medio y el glúteo menor; ambos músculos le ayudan a tomar impulso extendiendo la articulación de la cadera. En esta tarea interviene también, entre otros, el bíceps femoral. En los seres humanos el glúteo mayor domina en la pelvis; este músculo sirve a la nueva función de estabilizar el tronco erguido. (El acortamiento del ílion hace descender el centro de masas y facilita el control.) Otros músculos mayores, tales como el glúteo medio, el glúteo menor, los iliopsoas y algunos más, cumplen también nuevas funciones auxiliares en la marcha erguida. Cuádriceps y gemelos se dedican a proporcionar propulsión.

que trabaje para sostener un tronco erguido de ese modo, se fatiga rápidamente. El ílion humano, drásticamente reducido, acorta el tronco y acerca su centro de masas a las articulaciones de la cadera, aliviando de ese modo las dificultades mecánicas del músculo.

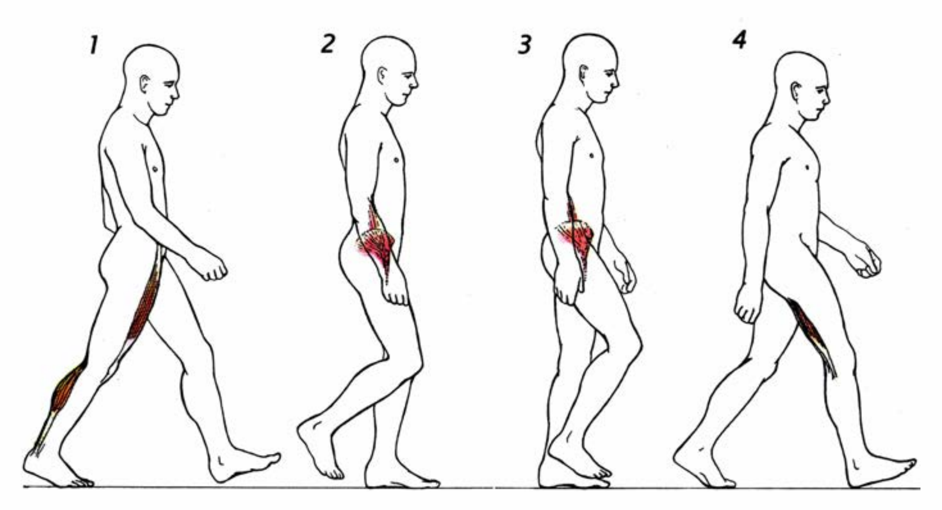
Los simios poseen un ílion largo, capaz de acomodar un segundo grupo de músculos que sufrieron transformaciones cuando nuestros antepasados comenzaron a andar erguidos: los glúteos anteriores, compuestos por el glúteo medio y el glúteo menor. En el chimpancé, estos músculos se extienden entre un punto de inserción cercano al extremo superior del ílion y otro situado en la parte externa del fémur superior. Merced a su posición, se comportan como poderosos extensores de la cadera durante los movimientos efectuados en la locomoción cuadrúpeda; gracias a la gran longitud del ílion, estos músculos poseen un sólido poder de contracción. Los seres humanos han podido prescindir de estos rasgos esqueléticos, casi universales en otros primates, porque la extensión de la cadera contribuye muy poco a la bipedia. Nuestros glúteos anteriores, liberados, cumplen una nueva función.

Esta nueva misión la entenderemos mejor si tomamos una vista superior de la marcha. Poco después de que el talón del pie adelantado se apoye sobre el suelo, la pierna retrasada se separa de la superficie y comienza a avanzar. En el ínterin, el tronco queda sostenido solamente por una cadera, situada en posición lateral con respecto al centro de gravedad del tronco. Si no fuese por la acción de los glúteos anteriores (también llamados, en los seres humanos, músculos abductores), la pelvis y el tronco se inclinarían, a cada paso, hacia el lado sin apoyo, provocando una rápida fatiga. La acción de dichos músculos evita que suceda tal cosa.

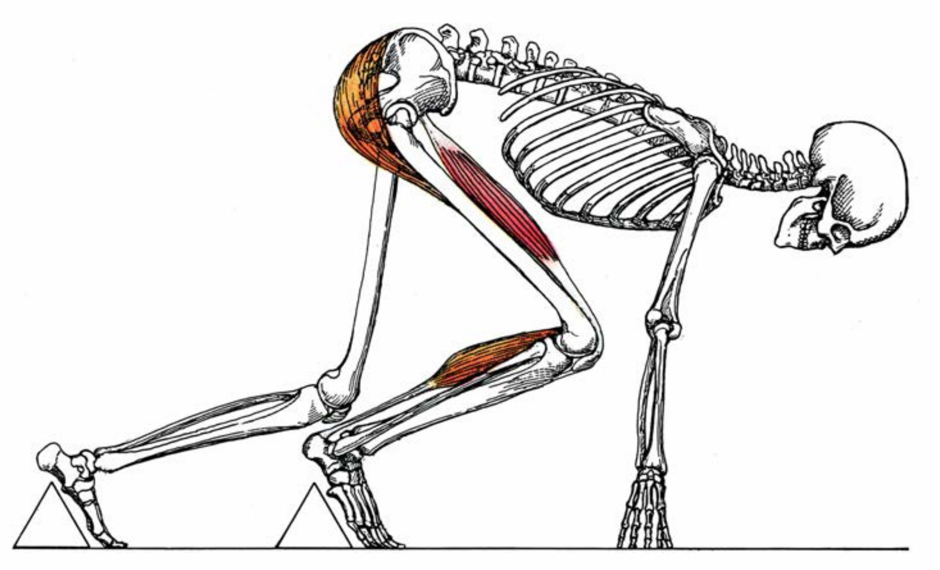
La transformación de los glúteos anteriores, de músculos propulsores en músculos estabilizadores, requiere cambios importantes en su posición. Una vista superior de la pelvis humana y de la del chimpancé revela que se ha producido una reorientación radical en las crestas ilíacas de la pelvis humana. En el chimpancé, las crestas, allanadas, se extienden más o menos en un solo plano, cruzando la parte posterior del tronco. En los seres humanos cada ílion ha rotado hacia adelante, arrastrando consigo los puntos superiores de inserción de los glúteos. El punto de inserción inferior cae sobre el lado externo del fémur superior, donde el hueso presenta un cuello que forma un ángulo para unir la pelvis a la articulación de la cadera. En los seres humanos los abductores se disponen lateralmente, fuera de las articulaciones de la cadera y colocados de modo que puedan equilibrar la pelvis ante al peso del tronco.

La reorientación de los huesos ilíacos requiere que se produzcan otros dos cambios más en el diseño de la pelvis, no dictados directamente por los mecanismos de la bipedestación. Si los ilíacos se hubiesen limitado a rotar hacia adelante, el espacio entre ellos habríase estrechado, sin dejar sitio para las vísceras inferiores. Para compensarlo, el sacro, que separa los huesos ilíacos en la región posterior de la pelvis, se ha dilatado y los ilíacos han cambiado de forma: ahora son cóncavos para que la flexión que ha reorientado los abductores acontezca a un lado, dejando un espacio amplio en el interior de la pelvis.

Sin embargo, al aumentar la distancia entre las articulaciones de la cadera, el ensanchamiento de la parte central

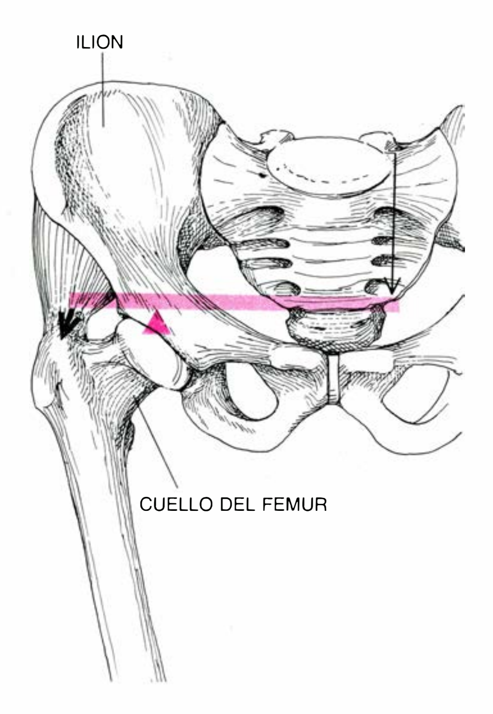


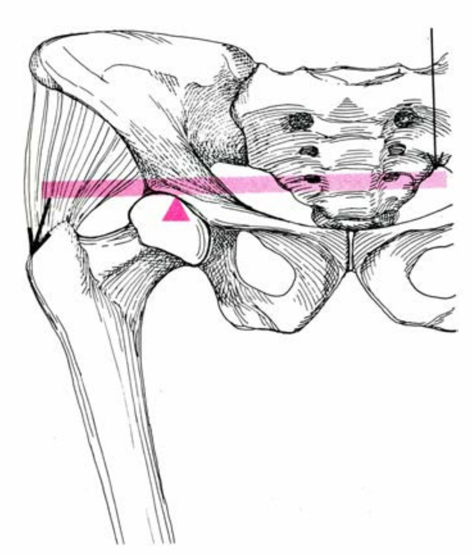
3. ESQUEMA DE LA ACTIVIDAD MUSCULAR desarrollada durante la marcha humana. En el momento en que la pierna que soporta el peso (en este caso la derecha) se angula por detrás del torso (*1*), dos grupos de músculos se contraen para extenderla, generando una "reacción del suelo" que impulsa el cuerpo hacia adelante; estos músculos son los gemelos, que hacen rotar el pie con respecto al tobillo y los cuádriceps, que enderezan la rodilla. Cuando el peso del cuerpo se transfiere a la pierna izquierda, el pie derecho se despega del suelo. La contracción de los iliopsoas comienza a tirar de la pierna derecha hacia adelante (*2*), mientras la rodilla se flexiona pasivamente (*3*). Casi al final del balanceo de la pierna, los músculos que ponen en conexión la pelvis interior con la parte posterior del fémur se contraen para detener el movimiento mientras que el pie se apoya sobre el suelo (*4*). La pierna izquierda debe generar en ese momento la reacción del suelo.



4. UN ATLETA, cuando se sitúa sobre los tacos de salida, recupera fugazmente las ventajas de ser cuadrúpedo: las articulaciones de la cadera y de la rodilla están fuertemente flexionadas (preparando las extremidades para una extensión potente y prolongada) y el centro de gravedad se sitúa muy adelantado con respecto a los miembros inferiores, lo que proporciona a la reacción del suelo una fuerte componente horizontal. La forma corriente de caminar o correr sacrifica estas ventajas. Una postura erguida requiere que las articulaciones de la cadera y de las rodillas estén totalmente extendidas y coloca el centro de gravedad del cuerpo casi directamente sobre las piernas. Ambos factores tienden a limitar la fuerza del suelo.

de la pelvis coloca los abductores en una posición de desventaja mecánica. La fuerza que esos músculos deben ejercer para compensar el peso del tronco depende en parte de la distancia que media entre el centro de masa del tronco y la articulación de la cadera.





5. CONTRACCION DE LOS ABDUCTORES (glúteo medio y glúteo menor) para equilibrar el tronco en los momentos en los que la pelvis está sostenida únicamente por una pierna. La articulación de la cadera actúa de fulcro: el peso del tronco y de la pierna no apoyada actúa por un lado y, los abductores, sobre el otro y en sentido contrario (*arriba*). Los abductores presentan una desventaja mecánica: la articulación de la cadera se sitúa en una posición bastante lateral con respecto al centro de gravedad del tronco, proporcionando al peso del cuerpo un largo brazo de palanca. En la pelvis de Lucy (*abajo*) el brazo de palanca del peso del cuerpo era más largo, pero la mayor expansión de los huesos ilíacos y la superior longitud del cuello del fémur colocaba a los abductores lejos de la articulación de la cadera, aumentando así su ventaja mecánica.

Cuanto mayor sea la separación de las articulaciones de la cadera más largo será el brazo de palanca del tronco y más trabajo habrán de realizar los abductores para contraerse y equilibrar este último. Será más probable la aparición de cansancio durante la marcha; la seguridad misma de la articulación de la cadera puede verse amenazada, ya que esta articulación quedará sujeta al peso del tronco y a la fuerza de contracción de los abductores.

La visión frontal de la pelvis humana nos revela cuál fue la solución evolutiva. El brazo de palanca de los abductores aumenta y su trabajo se realiza con más facilidad si sus puntos inferiores y superiores de inserción se alejan de la articulación de la cadera. Dos rasgos de la pelvis humana sirven a este propósito. La compleja curvatura del ílion humano incluye una expansión que desplaza el punto superior de inserción de los abductores hacia los lados de la cadera. Además, el cuello del fémur humano es más largo que el del chimpancé. Un cuello femoral más largo sirve también para desplazar el punto inferior de inserción de los abductores hacia afuera, así como para aumentar su fuerza de palanca.

De esta manera, un conjunto de músculos —los glúteos anteriores— que en los chimpancés ayudan a la toma de impulso, han llegado en el caso del hombre a contribuir a la estabilización de la pelvis. También es evidente la asunción de un nuevo papel por parte de otro grupo de músculos que en los chimpancés cumplen una función propulsora: los que conectan la pelvis inferior con la parte posterior del fémur. En la marcha cuadrúpeda, funcionan como potentes extensores de la cadera; contribuyen a la reacción del suelo incluso más que lo aportado por los glúteos anteriores. En cambio, en la marcha bípeda no sirven para la extensión de las extremidades, sino para controlarlas.

Un bípedo debe impulsar rápidamente una pierna hacia adelante cuando ésta no se halla soportando peso; efectúa este movimiento con la extremidad completamente extendida, en vez de flexionada como ocurre en los cuadrúpedos. Su centro de masa se sitúa, pues, bastante desplazado de la pelvis. Como si fuese un largo péndulo, la pierna extendida tiene un gran momento de inercia y requiere poderosos impulsos musculares para iniciar y detener el movimiento. El iliopsoas, músculo que arranca del interior de la pelvis y se extiende hasta un punto de inserción situado sobre el fémur, justo debajo de la articulación de la cadera, se contrae para impulsar la extremidad hacia adelante. Una vez que el miembro ha finalizado su movimiento de balanceo, éste debe ser controlado. La posición de los músculos que conectan la pelvis inferior con la parte posterior del fémur, posición que no ha experimentado cambios con respecto a la que ocupa en otros primates, les capacita para encoger y frenar la extremidad.

En los seres humanos, la necesidad de estabilizar la pelvis y controlar las extremidades ocupa, pues, a varios grupos de músculos que en el chimpancé sirven para propulsión. Sólo dos grupos de músculos, los cuádriceps y los gemelos, permanecen en una posición que les permite producir una reacción del suelo. Los cuádriceps constituyen una masa formada por cuatro músculos que, en el hombre, representan la mayor parte de la zona delantera del muslo. Acaban en un robusto tendón que cruza la *patella* o rótula y que está anclado a la parte superior de la tibia, el hueso principal de la pierna.

Cuando, al caminar o correr, la extremidad que soporta el peso del cuerpo se angula por detrás del tronco, esa poderosa masa muscular encoge y estira la rodilla. Los gemelos, músculos que nacen en la parte posterior de la pierna y se fijan al talón por medio del tendón de Aquiles, se encogen en sincronía con los cuádriceps y promueven la rotación del pie con respecto al tobillo. La extensión de la rodilla y la rotación del pie, junto con el alargamiento de la pierna retrasada, producen una fuerte reacción del suelo.

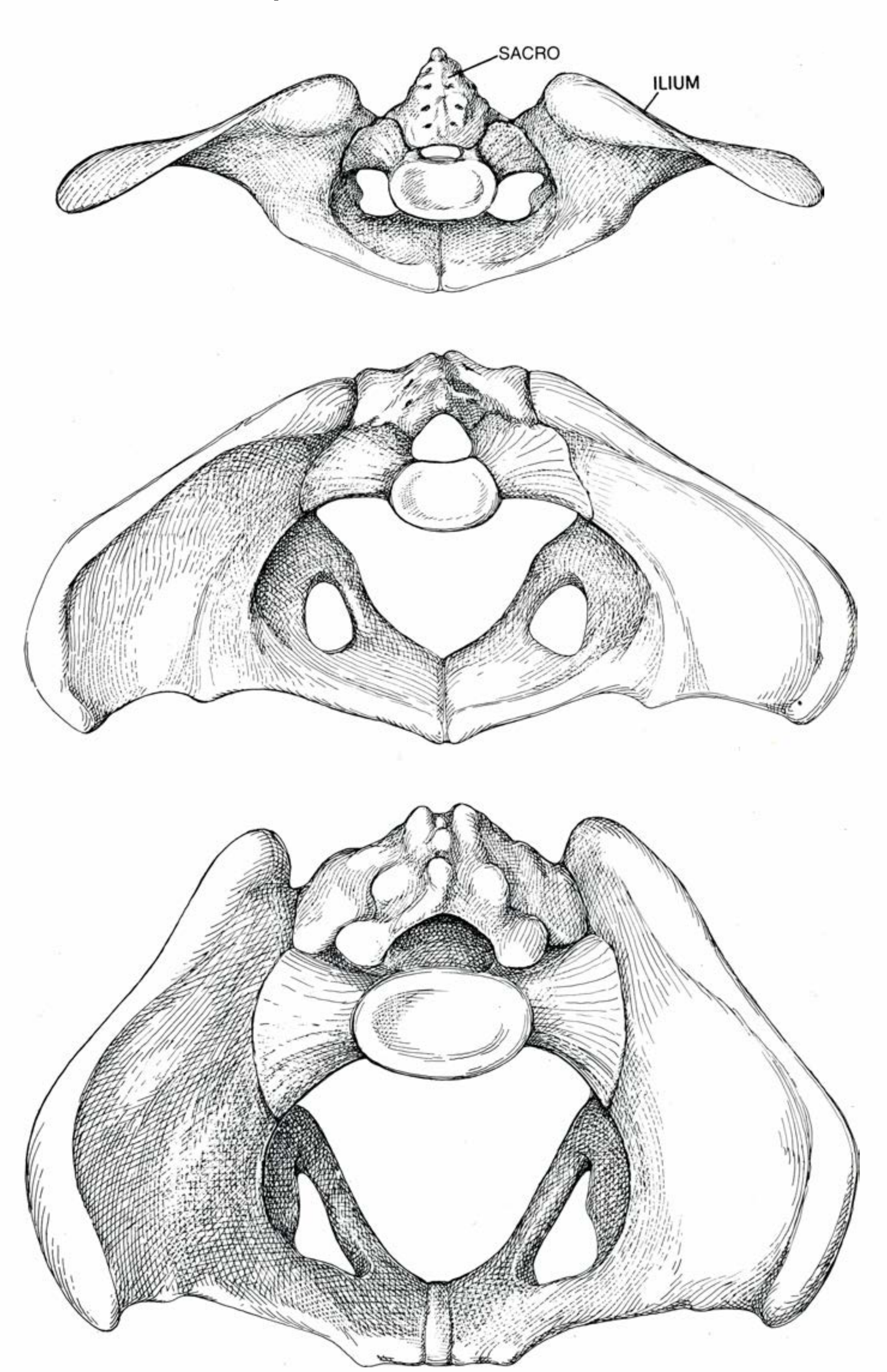
¿Qué grado de desarrollo presentaba, según cabe deducir de los restos fósiles, ese conjunto de adaptaciones musculares en la época en que vivían Lucy y sus congéneres? El material descubierto incluía un sacro casi intacto, aunque el hueso innominado asociado a él apareció roto y destruido en parte; este último hueso constaba de cerca de 40 piezas, cementadas formando una masa única dentro de la matriz rocosa donde se conservaron. Con frecuencia, cuando un fósil aparece en estas condiciones, los trozos sueltos pueden recuperarse y montarse de nuevo como si se tratase de piezas de un rompecabezas. Pero los fragmentos del hueso innominado de Lucy no podían separarse sin que peligrase su integridad. Preferí, pues, sacar un molde de cada pieza; los coloqué en su posición

anatómica correcta; el innominado así restaurado constituía la imagen especular del original, reconstruyendo de este modo el hueso que ocupa una posición opuesta y equivalente a la suya. Obtuvimos así la pelvis completa de un antepasado del hombre con casi tres millones de años de antigüedad.

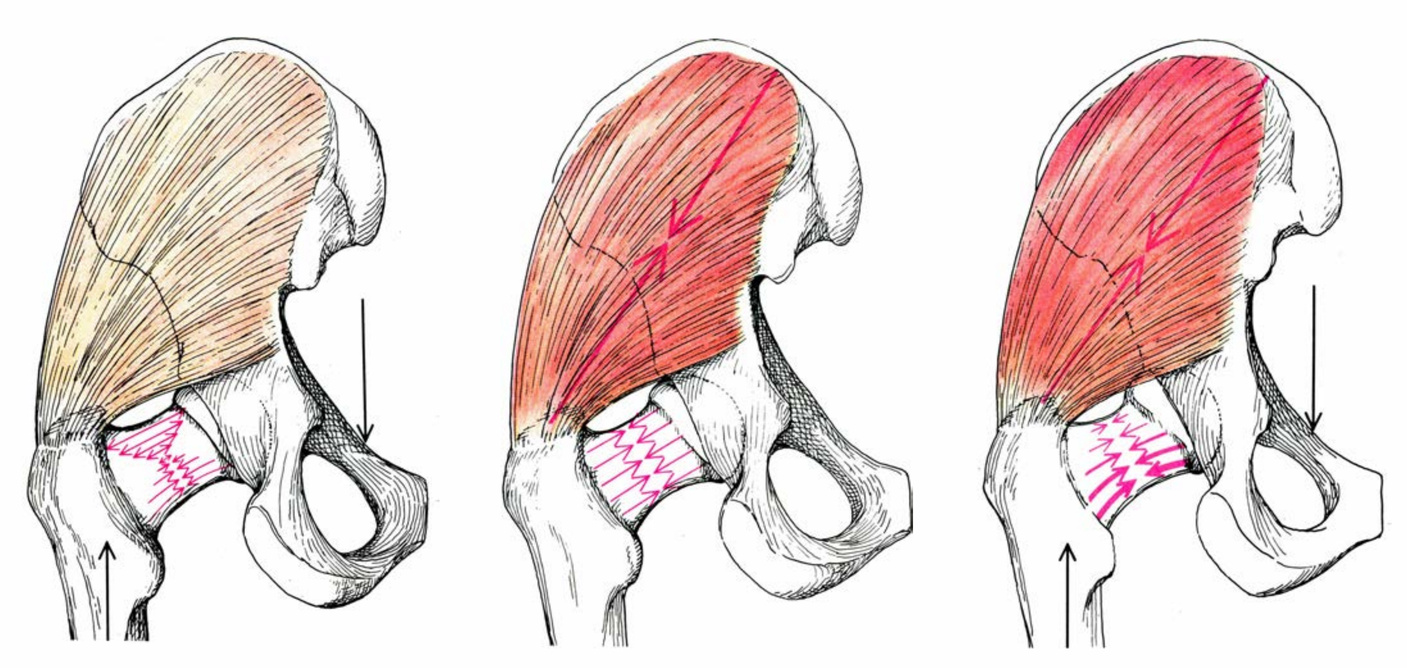
La pelvis presenta casi todas las señales de la bipedia, según la entendemos hoy. Los huesos ilíacos son mucho más cortos que los de la pelvis de un simio. El acortamiento habría permitido bajar la posición del centro de gravedad, haciendo así más fácil mantenerse erguido. Además, los huesos ilíacos se han curvado proporcionando una inserción lateral a los abductores, que son los músculos que estabilizan la pelvis de un bípedo cuando ésta se apoya sólo en una pierna. Pueden observarse también los puntos de inserción del glúteo mayor, de los abductores y de los cuádriceps; tales puntos indican que, en Lucy, estos músculos habían alcanzado un tamaño y una disposición semejante al ser humano. Lo mismo sucede con los iliopsoas, el flexor de la cadera que inicia el movimiento de balanceo de la pierna: un surco situado sobre el borde de la pelvis, por delante de la articulación de la cadera, equivale al surco que indica la dirección del músculo en la pelvis humana.

En ciertos aspectos, la pelvis de Lucy ofrece un diseño mejor para la bipedestación que el aportado por la especie humana. Los huesos ilíacos se ensanchan y curvan hacia afuera de manera más acusada que en una pelvis moderna; los cuellos femorales son más largos. Los músculos abductores disfrutan así de mayores ventajas mecánicas que en los representantes femeninos de nuestra especie. Algunas ventajas de los abductores compensaban la separación ligeramente mayor que existía entre las articulaciones de la cadera (separación que proporcionaba al tronco un brazo de palanca más largo). Con todo, las medidas precisas realizadas tanto en el brazo de palanca del abductor como en el del tronco —mediciones posibles gracias a que la pelvis de Lucy esté entera— muestran que la ventaja de su abductor es todavía mayor que la nuestra. Sus abductores necesitaban ejercer menos fuerza para estabilizar la pelvis y esto reducía la presión sobre la superficie de las articulaciones de la cadera.

¿Por qué razón un homínido de hace tres millones de años poseería tal ventaja mecánica con respecto a sus descendientes? La respuesta tiene que ver con el desarrollo acelerado que experimentó el cerebro humano durante los últimos tres millones de años. La pelvis de Lucy fue diseñada casi especialmente para la bipedia. La expansión de las alas ilíacas y la longitud del cuello del fémur, más acentuadas que en los seres humanos, aumentaban en el caso de Lucy el brazo de palanca de los abductores, pero daban como resultado una pelvis notablemente elíptica, originando un canal de parto ancho en sentido transversal y corto en sentido antero-posterior. La constricción pudo tolerarse gracias a que Lucy se anticipó a



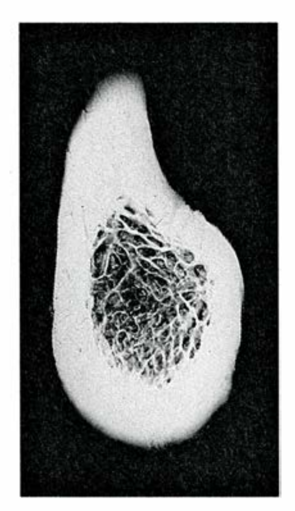
6. ROTACION DE LOS HUESOS ILIACOS. Comenzó cuando los antepasados del hombre empezaron a caminar erguidos. En un simio cuadrúpedo, como el chimpancé (*arriba*), los huesos ilíacos (vistos aquí desde un plano superior) son aplanados y se extienden hacia la parte posterior del tronco. En Lucy (*centro*) estos huesos se han curvado proporcionando puntos laterales de inserción para los músculos abductores, encargados de estabilizar la pelvis durante la marcha. La concavidad aparece en la zona más alejada del centro de la pelvis, dejando espacio para las vísceras; además, el sacro, hueso que separa a los dos huesos ilíacos, se ha ensanchado. Estos cambios morfológicos han persistido en la pelvis humana moderna (*abajo*), que al mismo tiempo se ha hecho más alargada en sentido antero-posterior para lograr un canal de parto ovoidal.

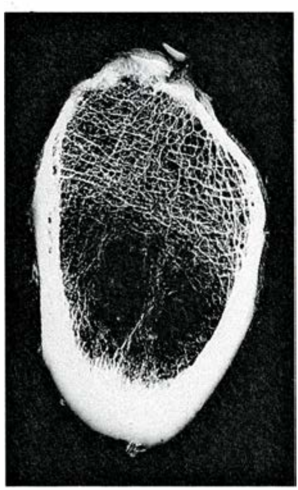


7. CUELLO DEL FEMUR (visto desde atrás); durante los movimientos de la locomoción humana está sometido a esfuerzos de orígenes distintos. El peso del cuerpo impone esfuerzos de flexión: tensión sobre la parte superior del cuello y compresión sobre la inferior (*izquierda*). Al mismo tiempo, los abductores actúan en una posición casi paralela al cuello del fémur, sometidos a compresión en toda su longitud (*centro*). La suma de los dos sistemas de esfuerzos da como resultado un gradiente de tensiones que varía desde valores bajos en la parte superior hasta elevados esfuerzos compresivos en la zona inferior (*derecha*).

la drástica expansión del tamaño del cerebro: el cráneo de sus fetos no sería mayor que el de un feto de chimpancé. Los procesos del parto en Lucy y sus congéneres debió ser algo más complejo que en el caso de los simios, pero mucho más fácil que entre los seres humanos [*véase la figura 9*].

Al tiempo que los antepasados del hombre desarrollaban un cerebro mayor, su apertura pélvica tendía a hacerse más redondeada. La pelvis tuvo que ensancharse en sentido antero-posterior y, al mismo tiempo, se contrajo en sentido transversal. Durante este tiempo la expansión de los huesos ilíacos se fue acortando, lo que provocó que, en la especie humana, los abductores poseyeran un brazo de palanca algo más breve que en el caso de Lucy (estos cambios son menos pronunciados en la pelvis de los varones, en los que ésta retiene parte de su antigua ventaja mecánica). Mientras tanto, la cabeza del fémur moderno se ha ensanchado para resistir la presión creciente que ejercen unos abductores obligados a desarrollar un esfuerzo mayor. Persiste, sin embargo, la dificultad que comporta acomodar, en la misma pelvis, una eficaz articulación de la cadera bípeda y un canal apropiado para el paso de un feto con un cerebro grande; razón por la cual el proceso del parto se convierte, en las mujeres, en uno de los más difíciles del reino animal.







8. ESTRUCTURA INTERNA DEL CUELLO DEL FEMUR. Constituye un criterio definidor de los bípedos habituales. Visto en un corte, el cuello del fémur de un chimpancé (*izquierda*) presenta un espeso anillo de sustancia ósea, además de una cresta de refuerzo en la parte superior (visible en esta sección como una protuberancia). Estos caracteres explican que el cuello femoral del chimpancé soporte los elevados esfuerzos de flexión que se producen al saltar o trepar. El cuello del fémur, en el caso del hombre (*centro*), presenta una delgada capa ósea sólo en la parte superior. Resulta únicamente adecuado para soportar los esfuerzos que se desencadenan en la marcha o en la carrera realizadas en posición erguida, cuando los músculos abductores equilibran la tensión producida sobre su parte superior. Un cuello de fémur fosilizado, perteneciente a un individuo contemporáneo de Lucy (*a la derecha*), muestra la misma estructura que en el hueso humano; de ello cabe deducir, pues, que se diseñó exclusivamente para la locomoción bípeda.

La estrecha semejanza entre la pelvis de Lucy y la de un ser humano actual, así como su marcado contraste con la de un chimpancé, corrobora su marcha totalmente erguida. Pero, ¿era habitual su progresión bípeda? ¿Había abandonado las demás formas de locomoción? Probablemente la reordenación muscular que la capacitó para andar erguida no le permitía llevar a cabo con eficacia movimientos cuadrúpedos sobre el suelo. Sin embargo, quizá se encaramaba todavía a los árboles o trepaba usando los cuatro miembros, tal como lo hacen la mayoría de los primates actuales.

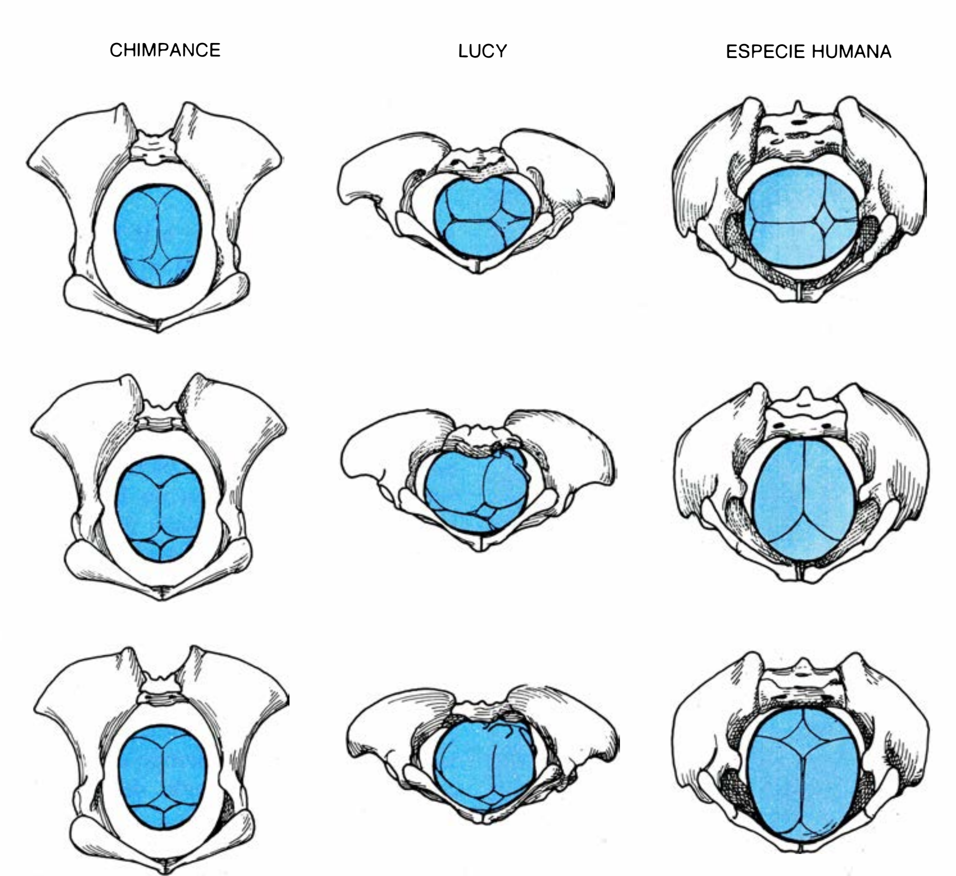
Los principios evolutivos básicos proporcionan los elementos para un veredicto sobre tal posibilidad. Ninguna especie desarrolla minuciosas modificaciones anatómicas adaptadas a una conducta particular, tal como el bipedismo, si, en consecuencia, no se ajusta a esa conducta. Para que la selección natural haya modificado tan profun-

damente, en función del bipedismo, el esqueleto heredado por Lucy, sus ancestros debían haber pasado ya la mayor parte del tiempo en posición erguida. De todos modos, el análisis del fósil de Lucy puede proporcionar pruebas más directas.

Dicho análisis atiende al cuello del fémur. Se concentra ahí gran parte de la tensión originada en la locomoción. Cuando la pierna está soportando peso, la articulación de la cadera transmite el peso del tronco al cuello del fémur. El cuello actúa como una palanca de transmisión: una especie de viga que está anclada en un extremo a una estructura de apoyo (la diáfisis del fémur) y sostiene una carga en el otro extremo. En virtud de esa transmisión se producen elevados esfuerzos de flexión en el anclaje de la viga. Un cuello de fémur largo, así el de Lucy, rebaja la presión sobre la articulación de la cadera al mejorar la acción de los abductores, pero entonces el cuello se somete a mayores esfuerzos de flexión.

El cuello del fémur es, en el chimpancé, mucho más corto que en un ser humano actual; sin embargo, está diseñado con solidez para aguantar las cargas impuestas por las acrobacias terrestres y arbóreas del animal. Un corte en el hueso revela la existencia de un canal medular central, rodeado por una gruesa capa de sustancia ósea densa. Ahora bien, un hueso denso es más débil bajo tensión que bajo compresión; por esa razón, la superficie superior de la estructura, sometida a tensión cuando el cuello flexiona, presenta una capa ósea notablemente más gruesa. Con esta espesa protuberancia ósea (una especie de "clavo" de hueso, visto en sección) el cuello del fémur del chimpancé imita el principio de una viga con perfil en I: el material se coloca allí donde puede resistir mejor los esfuerzos de flexión.

Por ser el cuello del fémur más largo en el hombre que en el chimpancé, y tener que resistir conjuntamente las fuerzas del peso del cuerpo y la contracción de los abductores, podía esperarse que su constitución fuese también más robusta. Una sección del hueso humano nos muestra algo sorprendente: el espesor del sólido anillo externo del hueso sólo aparece en la parte inferior, mientras que el resto del cuello está revestido de una delgada cubierta ósea y rellenado por un entramado de finas placas óseas, las trabéculas. Un hueso poroso de este tipo, tal como se podría esperar, es más débil que el material compacto.



9. LOS PROCESOS DEL PARTO han competido con la bipedestación en conformar la pelvis humana moderna. En la pelvis del chimpancé (mostrada desde atrás), la cabeza del feto desciende sin dificultad a través de la entrada (*arriba*), plano medio (*centro*) y salida (*abajo*) del canal del parto. En Lucy, el proceso del parto fue algo más difícil: sus huesos ilíacos, cortos y cóncavos, eran adecuados para el bipedismo, pero originaban un canal de parto que, aunque ancho en sentido transversal, se estrechó en sentido antero-posterior. El cráneo del feto solamente podría pasar si primero giraba hacia un lado y después se inclinaba. El cerebro, mucho mayor, de un feto humano requiere un canal de parto más redondeado. El necesario alargamiento de la pelvis en sentido antero-posterior redujo el ensanchamiento de los huesos ilíacos y, por tanto, la ventaja mecánica de los músculos abductores; aun así, el proceso del parto en la especie humana es complejo y traumático, requiriendo una segunda rotación del cráneo dentro del canal del parto. La ilustración se basa en otra de Robert G. Tague, de la Universidad de Louisiana, y Linda Budinoff, de la estatal de Kent.

La parte superior del cuello del fémur, donde presumiblemente se concentran los mayores esfuerzos de tensión, contiene menos sustancia ósea que cualquier otra parte de esta estructura. ¿Cómo puede nuestro cuello femoral resistir el aumento de esfuerzos determinado por su longitud y función, siendo menos robusto que el cuello femoral del chimpancé?

La respuesta se encuentra en la acción de los músculos que operan exclusivamente en la marcha bípeda: los abductores. Estos músculos presentan líneas de acción que no son verticales, sino inclinadas; estas líneas hacen que los músculos se dispongan aproximadamente paralelos al cuello del fémur. Cuando los abductores se contraen, empujan el cuello del fémur hacia el interior de la cadera, comprimiéndolo en sentido longitudinal. Esfuerzo que se combina con los que resultan de la flexión (tensión sobre la parte superior del cuello y compresión sobre la inferior). Se trata de eliminar tensión en la zona superior del cuello del fémur y crear un gradiente de esfuerzos que crece desde esa parte superior, donde el esfuerzo es ahora mínimo, hacia la parte inferior, donde el esfuerzo es elevado aunque puramente compresivo. En el hombre, la zona inferior del cuello del fémur presenta una robusta capa de hueso compacto e incluso la capa porosa que rellena el resto de la sección resulta razonablemente resistente durante el tiempo que permanece bajo compresión.

Hay otros músculos que ayudan a los abductores a mantener el cuello del fémur bajo compresión, cuando éste se encuentra sometido a carga. El más importante: el piramidal de la pelvis, que nace en la parte frontal del sacro y se extiende hasta el extremo del cuello del fémur. Esa orientación permite que el músculo incremente el nivel de compresión del cuello del fémur. La acción

sincronizada de todos estos músculos, en el momento en que el peso del cuerpo está soportado sólo por una pierna, posibilita que este hueso, aparentemente frágil, resista su carga.

Debido, sin embargo, a la distribución de su masa ósea, el cuello del fémur sería vulnerable si los abductores y otros músculos no actuasen en perfecta sincronía. El cuello del fémur constituye un punto crucial de fracturas en las personas de edad avanzada, pero esto no sucede porque la calidad del hueso sea menor en los ancianos. Las "caderas rotas" resultan de la disminución de la coordinación muscular. Así, el diseño del cuello del fémur humano requiere la acción muscular propia de la marcha bípeda. En cambio, está deficientemente preparado para trepar y realizar acrobacias arbóreas, casos en los que frecuentemente se encontraría sometido a esfuerzos de flexión sin que al mismo tiempo estuviese comprimido por la acción de los abductores.

En *Australopithecus*, el cuello del fémur, más largo que en los seres humanos, estuvo sometido a esfuerzos de flexión aún mayores. Si estos antepasados del hombre hubiesen trepado a los árboles, sometiendo el cuello del fémur a esfuerzos de tensión sin que al mismo tiempo se produjese la acción coordinada de la compresión ejercida por los abductores, el hueso tendría que haber sido incluso más robusto que en los simios. ¿Fue así? En la misma localidad donde se descubrió Lucy se hallaron varios fémures fragmentados durante su largo enterramiento, aportando así una visión de la estructura interna del hueso. Todos los ejemplares muestran un rasgo humano: una delgada capa ósea en la parte superior del cuello del fémur. Por tanto, en Lucy el cuello del fémur estaba adaptado exclusivamente al bipedismo. No se trata de que pudiera caminar erguida de vez en cuando; esa postura se había convertido en su única alternativa.

Me he concentrado en el estudio de la anatomía de la pelvis de Lucy ante las evidentes señales de bipedismo que ofrece. Una revisión del resto de su esqueleto y de los esqueletos de otros *Australopithecus* revelaría, igualmente, las drásticas modificaciones producidas en favor del bipedismo, modificaciones que excluyen cualquier otro modo de locomoción. La rodilla, por ejemplo, está adaptada para soportar un esfuerzo mayor en el momento de su extensión que la rodilla de otros primates; su diseño sitúa al fémur en una posición sobre la tibia que forma un ángulo muy pequeño con aquélla, de tal modo que, cuando el peso del cuerpo está sustentado sólo por una pierna, el pie puede colocarse directamente bajo el centro de masas del cuerpo. El tobillo ha sufrido también modificaciones para poder soportar el peso del cuerpo: el arco plantar actúa de amortiguador y ayuda al pie a aguantar la carga añadida. El pulgar del pie ya no es oponible, como ocurre en los simios cuadrúpedos, sino que se extiende paralelo a los otros dedos. El pie se ha convertido ahora en una palanca propulsora para la postura erguida en vez de comportarse como una especie de garra al servicio de los desplazamientos arbóreos. Los brazos son ya menos adecuados para trepar: tanto ambas extremidades en sí como los dedos de las manos son más cortos que en los simios.

Los antepasados de Lucy debieron haberse erguido sobre dos extremidades y abandonado la vida arbórea bastante antes de que ella viniera al mundo, probablemente en los orígenes de la evolución humana. He explicado en otra parte por qué el bipedismo, con sus numerosas desventajas, apareció mucho tiempo antes de que nuestros ancestros comenzaran a usar sus manos (que a partir de ese momento quedaban libres) para llevar utensilios o armas: todo ello formó parte de una estrategia reproductiva en la que el macho era quien se hacía cargo del suministro de alimentos, estrategia que permitió a los primeros homínidos florecer y diversificarse. Aunque se trata de una argumentación sometida hoy a debate, no dejan de ser concluyentes las pruebas que señalan que esta curiosa forma de locomoción fue una de las primeras características anatómicas que marcan el ascenso hacia la vida cognoscitiva.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HUMAN WALKING. Verne T. Inman, Henry J. Ralston y Frank Todd. Williams & Wilkins, 1981.

LUCY: THE BEGINNINGS OF HUMANKIND. Donald C. Johanson y Edey Maitland. Simon & Schuster, 1981.

THE ORIGIN OF MAN. C. Owen Lovejoy en *Science*, vol. 211, n.º 4480, págs. 341-350; 23 de enero de 1981.

THE OBSTETRIC PELVIS OF A. L. 288-I (LUCY). Robert G. Tague y C. Owen Lovejoy en *Journal of Human Evolution*, vol. 15, n.º 4, págs. 237-255; mayo de 1986.

Vacunas para el Tercer Mundo

Se utilizan ya seis vacunas diferentes. De aquí a diez años, podrían introducirse muchas más. Sin embargo, quienes poseen los medios necesarios para fabricarlas carecen de incentivos para hacerlo

Anthony Robbins y Phyllis Freeman

Durante los últimos 25 años, las Naciones Unidas han puesto en marcha varios programas de inmunización con los que se han conseguido resultados sorprendentes en los países en vías de desarrollo. Pero ese rápido progreso corre peligro de estancarse, lo que podría tener consecuencias trágicas, a tenor de los logros alcanzados hasta ahora. Hace 10 años, se erradicó la viruela y, más recientemente, se han reducido de forma significativa las muertes e incapacidades causadas por seis enfermedades importantes: el sarampión (que todavía produce la muerte de dos millones de niños en el Tercer Mundo cada año), la difteria, la tos ferina, el tétanos, la polio y la tuberculosis. En 1974, se inmunizó contra esas enfermedades a un 5 por ciento de la población infantil de los países subdesarrollados; hoy en día, gracias al Programa Ampliado de Inmunizaciones (PAI) de la Organización Mundial de la Salud, casi el 50 por ciento de los niños se muestran totalmente inmunizados, es decir, reciben las dosis prescritas de las seis vacunas. El PAI se propone abarcar a toda la población infantil del mundo en 1990.

ANTHONY ROBBINS y PHYLLIS FREEMAN empezaron a estudiar los problemas del desarrollo de vacunas nuevas en 1984, mientras trabajaban para el Congreso de los Estados Unidos. Robbins es profesor de salud pública en la Facultad de Medicina de la Universidad de Boston. Cursó el primer ciclo de la carrera de medicina en el Colegio de Harvard (1962) y se doctoró por la Universidad de Yale (1966). Tres años después se sacó la maestría en administración pública. Freeman es profesora y presidente del Centro de Jurisprudencia del Colegio de Servicios Públicos y Comunitarios de la Universidad de Massachusetts en Boston. Cursó la carrera de derecho en la Universidad de Northeastern. En 1986, el Instituto de Medicina de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos le concedió una beca de investigación.

Queda todavía mucho camino por andar. En concreto, se necesitan vacunas nuevas o mejores para muchas otras enfermedades infecciosas que producen innecesariamente muertes e incapacidades en el Tercer Mundo, donde viven cuatro de cada cinco niños del planeta. Los niños constituyen el objetivo primordial de los programas de vacunación, ya que son las víctimas principales de las enfermedades infecciosas. En Africa, Asia e Iberoamérica, las infecciones agudas de las vías respiratorias (tales como las neumonías producidas por las bacterias *Streptococcus pneumoniae* y *Hemophilus influenzae* tipo b y por los virus parainfluenza y respiratorio sincitial) y las enfermedades diarreicas (como las producidas por los rotavirus y por las bacterias *Shigella*, *Vibrio cholerae* y ciertos tipos de *Escherichia coli*) provocan anualmente la muerte de ocho millones de niños menores de cinco años. Estas infecciones, junto a otras enfermedades, especialmente el sarampión, la malaria, el tétanos, la meningitis y la fiebre tifoidea, causan la muerte de unos catorce millones de niños menores de cinco años y producen incapacidades graves a muchos millones más.

No deja de llamar la atención que existan los conocimientos científicos necesarios para fabricar las vacunas requeridas. En distintos laboratorios de todo el mundo, se han producido ya muchas vacunas de ésas. Sin ir más lejos, en 1986 el Instituto de Medicina de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos describía 19 infecciones prioritarias para las que era factible, desde un punto de vista técnico, producir vacunas nuevas o mejores hacia el año 1996 [*véase la figura 3*].

Los obstáculos que se oponen a la evaluación, producción industrial y distribución de las vacunas necesarias son de tipo económico y político. La ONU carece de los recursos para producir las vacunas y las empresas —la mayoría en países avanzados— que tienen la experiencia tecnológica y la capacidad para desarrollar las vacunas humanas no muestran especial interés en hacerlo.

A lo largo de los últimos cuatro años hemos venido estudiando las necesidades del Tercer Mundo en materia de vacunas. Hemos dialogado con los responsables de la salud pública de muchos países en vías de desarrollo, así como con directivos del PAI y con la mayoría de fabricantes de vacunas de todo el mundo. Y hemos comprobado que el problema tiene solución. Pero es preciso que el público y las personas implicadas en el desarrollo y producción de las vacunas entiendan por qué el PAI ha obtenido éxitos importantes en el pasado, cuáles son los retos del presente y dónde se encuentra el espacio para la cooperación entre los que poseen y los que necesitan.

Aunque no será fácil encontrar la manera de producir y distribuir las vacunas que precisa el Tercer Mundo, debe hacerse. Los programas de vacunación resultan menos caros, más fáciles de llevar a cabo y, en ocasiones, más eficaces que otros proyectos de salud pública que actualmente están más o menos en funcionamiento. Podría, por ejemplo, prevenirse muchas enfermedades controlando los factores responsables de su propagación: la elevada concentración de insectos transmisores de enfermedades (vectores), el hacinamiento y las fuentes insalubres de agua para beber y cocinar. Sin embargo, los programas para el control de los vectores, incluidos los destinados a la eliminación de los mosquitos que transmiten la malaria, no siempre consiguen sus objetivos. Aún más, muchos países no pueden, todavía, afrontar el gasto económico necesario para mejorar las condiciones de las viviendas, la sanidad y el suministro de agua potable.

La distribución de medicamentos en el Tercer Mundo resulta, igualmente,

problemática. Pensemos en los antibióticos, fármacos muy eficaces contra ciertas enfermedades o sus complicaciones secundarias, por ejemplo la shigellosis (que produce alrededor de 650.000 muertes anuales, fundamentalmente en niños) y las infecciones bacterianas que suelen acompañar al virus respiratorio sincitial. Y pensemos también en la terapia de rehidratación oral, que repone los líquidos y minerales perdidos en las enfermedades diarreicas y es una forma barata y fácil para controlar muchas de estas enfermedades; tan sólo es necesario mezclar los preparados del paquete con agua hervida y administrar la solución al niño.

Pues bien, los antibióticos y muchos otros medicamentos resultan caros, en parte porque se necesitan muchas más dosis que en el caso de las vacunas. Además, los servicios de atención médica que han de identificar a los niños enfermos, obtener el diagnóstico de laboratorio y administrar el tratamiento apropiado, no se conocen todavía en muchos países subdesarrollados. Ni hay, en muchas áreas, programas de educación pública a través de los cuales pudiera enseñarse determinadas terapias a la población, que exigen escasos conocimientos médicos: la propia rehidratación oral.

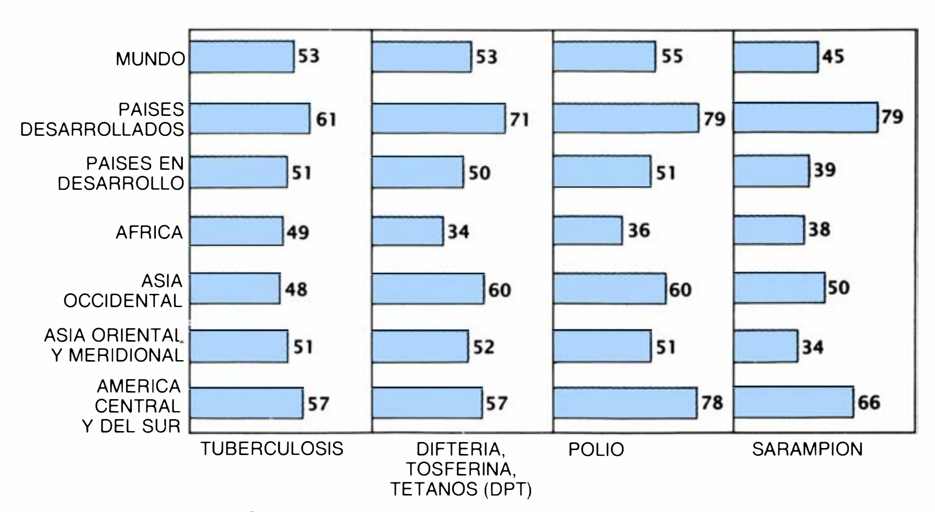
Las dificultades existentes para llevar a cabo programas de control de vectores, higiene, viviendas y asistencia médica subrayan el interés que encierra la preparación de vacunas para el Tercer Mundo que atajen la mortalidad y las incapacidades: existe la infraestructura necesaria para distribuir las vacunas a los niños (el PAI). No sería difícil aprovecharla para el reparto de vacunas nuevas contra otras enfermedades. En el futuro, esa misma infraestructura podría ampliarse a otros servicios fundamentales para la supervivencia de los niños, tales como la planificación familiar.

¿Cómo ha conseguido el PAI ese éxito impresionante? ¿Por qué no puede ampliar su arsenal de vacunas abundando en la misma estrategia? Para responder a la primera pregunta, diremos que el PAI debe parte de su éxito a una optimización de las fuerzas invertidas: después de una duplicación inicial de esfuerzos, la OMS ha trabajado en estrecha colaboración con el Fondo Infantil de las Naciones Unidas (UNICEF), que posee una dilatada experiencia en el cuidado de los niños del Tercer Mundo. Ambas organizaciones han colaborado con las autoridades sanitarias de las naciones participantes en el desarrollo de los sistemas de obtención del equipamiento, capacitación del personal encargado de distribuir las vacunas y control de que las vacunas llegaran a su destino en buen estado. Por otra parte, desde 1984, el Banco Mundial y la Fundación Rockefeller han colaborado con ambos organismos de las Naciones Unidas. En 1984, las cinco entidades constituyeron la Agrupación de Fuerzas para la Supervivencia del Niño, con el fin de aumentar los fondos y de multiplicar las actividades generales del PAI.

Los administradores del PAI encontraron también la manera de obtener vacunas a precios muy baratos: escogieron las vacunas que se venían ven-



1. INMUNIZACION DE UN NIÑO en China. Millones como él, de países en vías de desarrollo, han sido vacunados contra seis enfermedades infecciosas de grave peligro durante los últimos 15 años dentro del programa de ampliación de inmunizaciones (PAI) de las Naciones Unidas. Las organizaciones participantes, entre ellas la Organización Mundial de la Salud y el Fondo Infantil de las Naciones Unidas (UNICEF), confían en poder administrar vacunas nuevas o mejores contra muchos otros patógenos que amenazan la población infantil del Tercer Mundo. (La fotografía ha sido tomada por Sean Sprague, de la UNICEF.)



2. PORCENTAJE DE NIÑOS (mayores de un año de edad) de distintas partes del mundo que, en 1986, recibieron todas las dosis prescritas de las vacunas del PAI contra la tuberculosis, la difteria, la tos ferina, el tétanos, la polio y el sarampión, según una estimación reciente de la UNICEF. El cuadro se ha reelaborado a partir del informe de la UNICEF sobre el estado de los niños del mundo en 1988; se basa en los datos proporcionados por la OMS, la propia UNICEF y la división de población de la ONU; no está incluida China, donde las tasas da vacunación suelen ser más elevadas que en cualquier otro país del Tercer Mundo. En 1974, no llegaba ni siquiera al cinco por ciento la cifra de niños que recibían todas las dosis de las seis vacunas. Hoy en día, un 50 por ciento se encuentra ya totalmente inmunizado, salvándose con ello 1.400.000 vidas por año.

diendo en los países desarrollados desde hacía muchos años. Las empresas farmacéuticas habían recuperado ya los gastos de la investigación y el desarrollo y, en consecuencia, podían permitirse la venta de sus productos a precios muy cercanos al de coste. La investigación se limita al descubrimiento de vacunas competitivas. El desarrollo es un proceso costoso y prolongado que incluye la producción de cantidades pequeñas, aunque de gran calidad, de la vacuna en prueba para valorarla, llevar a cabo ensayos clínicos donde comprobar su seguridad y su eficacia y determinar las dosis apropiadas, además del cumplimiento de los requisitos de licencia y la generación de los métodos necesarios para producirla en serie y con la calidad debida para su distribución. Muchas vacunas prometedoras se quedan estancadas en alguna fase de su desarrollo.

La recuperación de la inversión no conlleva necesariamente el abaratamiento de los precios. Sin embargo, varias empresas privadas e instituciones públicas han optado por hacerlo así por distintas razones. El Instituto Nacional de Salud Pública de los Países Bajos, controlado por el gobierno, actúa de ese modo por el compromiso contraído, desde hace ya tiempo, con la salud pública. Ese y otros fabricantes no esperan obtener beneficios de las vacunas vendidas en su nación o en otras. Los países comunistas suelen colaborar por razones humanitarias y, también, por razones de prestigio político en los países en vías de desarrollo, interés que se da, asimismo, en todos los fabricantes que intervienen en la ayuda. En el caso de las firmas comerciales, el reconocimiento de su colaboración en el PAI puede facilitarles la intervención en la venta de fármacos más rentables, la adquisición de materias primas y otros negocios.

Muchos fabricantes cooperan también porque consideran que se trata de una empresa lucrativa. La venta al PAI de grandes cantidades de vacunas establecidas desde hace mucho tiempo puede ser rentable, incluso a un precio de venta barato, ya que los fabricantes que pueden producir más vacunas de las que venden en su nación o en otros mercados del mundo desarrollado trabajan en una economía a gran escala. Las empresas farmacéuticas pueden aumentar su producción y realizar controles de calidad con el personal y el equipo disponible, rebajando los costes por unidad producida. Vendiendo las vacunas al PAI a precio casi de fabricación, recuperan una parte sustancial de sus gastos de producción y obtienen mayores beneficios de los lotes más caros que venden por las vías comerciales habituales.

La experiencia comercial dicta que no es rentable producir una vacuna para una población base por debajo de 40 millones. Por ello, algunas empresas con mercados domésticos pequeños, así la Smith Kline RIT de Bélgica, se han mostrado dispuestas incluso a aumentar su producción para introducirse en el mercado del PAI y, de ese modo, optimizar el rendimiento de las operaciones.

Aunque el PAI ya era capaz de aprovechar las distintas motivaciones de muchos fabricantes de vacunas para obtener precios bajos antes de 1983, a partir de esa fecha consiguió reducir todavía más sus gastos a través de un sistema de ofertas. La UNICEF, que adquiere la mayoría de las vacunas administradas en Africa y algunas de las distribuidas en Asia, y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), que compra las vacunas para Iberoamérica, solicitan, para cada vacuna, ofertas de varios fabricantes y contratan la más ventajosa. La propia OMS se dedica más a la ciencia, la administración y la formación de personal que a la obtención de vacunas.

Desde la instauración del sistema de ofertas, todos los fabricantes interesados proceden de Canadá, Europa y Japón. El mercado doméstico de los Estados Unidos es tan grande que las firmas farmacéuticas no tienen necesidad de competir con otros o de trabajar con el PAI. Igualmente, han perdido el interés por vender vacunas al PAI a bajos precios porque han recibido críticas del Congreso por no ofrecer precios similares en su propio mercado.

En 1988, el sistema de ofertas permitía que la UNICEF y la OPS adquirieran vacunas al precio baratísimo de cinco centavos de dólar por dosis, lo que significaba, aproximadamente, medio dólar por la compra de todas las dosis de las seis vacunas. El PAI gastaba más de 10 veces esa cantidad por niño en otros asuntos aparte de las vacunas: transporte, personal que administra las vacunas y equipo de refrigeración encargado de proteger las vacunas en una "cadena frigorífica".

La estrategia de actuación se basa, hoy en día, en la utilización de vacunas en uso desde hace mucho tiempo y se enfoca hacia la compra de productos excedentes. Se aprovecha de todos los incentivos que puedan tener los fabricantes para vender sus productos a precios próximos al coste de producción o incluso por debajo. Este sistema continúa siendo muy efectivo y, una vez instaurados los mecanismos apropiados de distribución, permitirá que el PAI consiga su objetivo de vacunar con las seis vacunas a todos los niños del mundo. En ese momento, el PAI repartirá más de un billón de dosis por año.

El programa debe afrontar hoy distintos retos. El PAI y la Agrupación de Fuerzas para la Supervivencia del Niño intentan resolver los problemas que supone la introducción en áreas donde los niños no reciben todavía las seis vacu-

nas en funcionamiento y asegurar que las vacunas se seguirán distribuyendo a cada nueva generación de niños, una vez se haya establecido la infraestructura en todo el mundo. El PAI afronta también constantemente la amenaza de un aumento de los precios. Por otra parte, hay problemas con las vacunas ya existentes. Por ejemplo, pierden parte de su potencia cuando son expuestas al calor, lo que constituye siempre un riesgo en los países en vías de desarrollo, donde los sistemas de refrigeración son, frecuentemente, inadecuados. El PAI necesita con urgencia vacunas que sean estables al calor y vacunas que aumenten la eficacia y el rendimiento del programa en otros sentidos; por ejemplo, una vacuna del sarampión que se pueda administrar en el momento mismo del nacimiento o poco después para que la protección fuera lo más precoz posible.

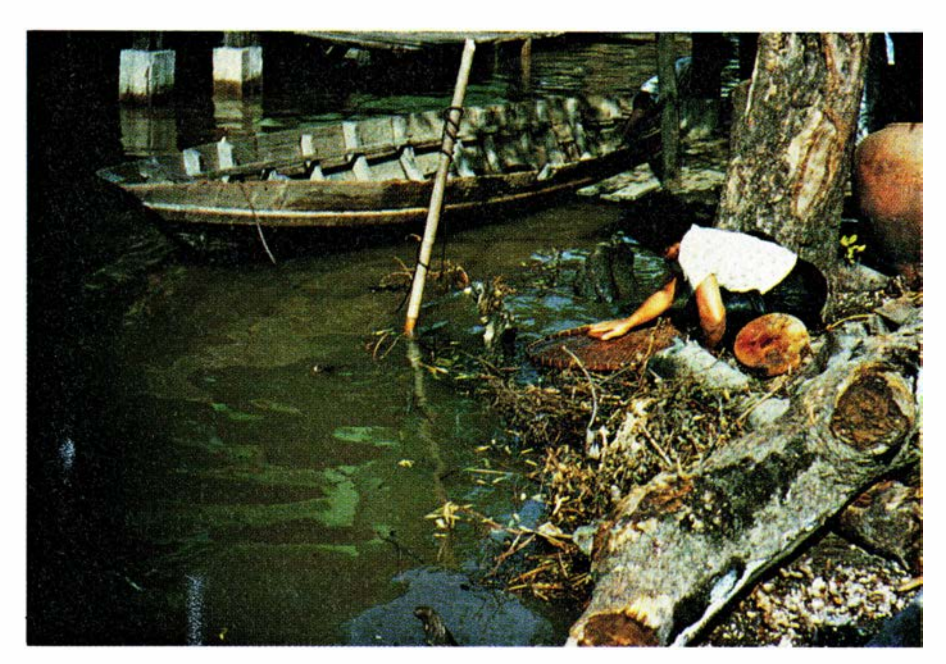
El problema de cómo conseguir vacunas nuevas ha recibido escasa atención hasta hace poco tiempo y todavía sigue siendo crítico. En realidad, es donde más se necesitan ideas y estrategias nuevas. Con la utilización de más vacunas no sólo se salvarían incontables vidas, sino que se ayudaría a mantener el interés de los políticos de las naciones en vías de desarrollo por establecer los sistemas necesarios para conseguir los objetivos del PAI: vacunar a todos los niños y mantener niveles altos de cobertura.

La ONU no ha olvidado totalmente el problema de la introducción de vacunas nuevas. La OMS patrocina el estudio de la creación y la valoración de vacunas nuevas contra enfermedades infecciosas del Tercer Mundo a través de cinco programas diferentes desarrollados en Ginebra. Estos programas fomentan la investigación de vacunas en laboratorios de todo el mundo. Sin embargo, en 1987 el presupuesto combinado de la OMS para la investigación y el desarrollo de vacunas era sólo de 10 millones de dólares anuales, una cifra muy por debajo de los 30 a 50 millones de dólares que el Instituto de Medicina estimaba necesarios para el desarrollo de una única vacuna.

Los obstáculos existentes para el desarrollo y la distribución de las vacunas necesarias son muchos; entre los más importantes, la decisión de desarrollar vacunas nuevas, que se halla casi exclusivamente en manos de unos cuantos institutos y empresas del mundo industrializado. El conocimiento y la capacidad técnica están concentrados en esos pocos institutos y firmas, algunos

PATOGENO	EFECTOS POTENCIALES	CASOS POR AÑO (Y MUERTES)	DEMANDA COMERCIAL
Virus del dengue	Fiebre, shock, hemorragias internas	35.000.000 (15.000*)	Pequeña, (viajantes a zonas endémicas)
Escherichia coli productora de toxinas intestinales	Diarrea acuosa, deshidratación	630.000.000 (775.000*)	Pequeña
Hemophilus influenzae tipo B	Meningitis, laringitis epiglótica, neumonía	800.000 (145.000*)	Grande
Virus de la hepatitis A	Malestar, anorexia, vómitos, ictericia	5.000.000 (14.000)	Pequeña
Virus de la hepatitis B	Igual que la hepatitis A; cirrosis crónica o cáncer de hígado	5.000.000 (822.000)	Moderado
Virus de la encefalitis japonesa	Encefalitis, meningitis	42.000 (7.000*)	Pequeña (viajantes)
Mycobacterium leprae	Lepra	1.000.000 (1000)	Ninguna
Neisseria meningitidis	Meningitis	310.000 (35.000*)	Alguna (durante las epidemias)
Virus parainfluenza	Bronquitis, neumonia	75.000.000 (125.000*)	Grande
Plasmodium	Malaria (con anemia, inflamación sistémica)	150.000.000 (1.500.000*)	Moderada (viajantes)
Virus de la rabia	Meningitis y encefalitis mortales	35.000 (35.000*)	Grande
Virus respiratorio sincitial	Infecciones respiratorias repetidas, neumonía	65.000.000 (160.000*)	Grande
Rotavirus	Diarrea, deshidratación	140.000.000 (873.000*)	Grande
Salmonella typhi	Fiebre tifoidea (con posible afectación de las plaquetas y daño intestinal)	30.000.000 (581.000*)	Pequeña (viajantes)
Shigella	Diarrea, disentería, infecciones crónicas	250.000.000 (654.000*)	Ninguna
Streptococcus grupo A	Infección garganta, posteriormente fiebre reumática y enfermedad renal	3.000.000 (52.000*)	Pequeña
Streptococcus pneumoniae	Neumonía, meningitis, otitis media grave	100.000.000 (10.000.000*)	Pequeña a moderada
Vibrio cholerae	Cólera (con diarrea y deshidratación)	7.000.000 (122.000*)	Pequeña (viajantes)
Fiebre amarilla	Fiebre, ictericia lesión renal, hemorragias	85.000 (9.000*)	Pequeña (viajantes)

3. LISTA DE PATOGENOS, según el Instituto de Medicina de la Academia Nacional de Ciencias, para los que se necesitan, en el Tercer Mundo, vacunas nuevas o mejores; se reconoce que podrían desarrollarse y registrarse antes de 1996. Pero muchas empresas farmacéuticas se resisten a invertir en el desarrollo de vacunas para el Tercer Mundo porque el proceso es costoso y las perspectivas de recuperar los gastos por ventas allí son muy limitadas. El número de casos y muertes producidos por cada patógeno se ha basado en el informe del instituto de 1986: *El desarrollo de vacunas nuevas: establecer prioridades*. El asterisco señala las enfermedades para las cuales los niños suponen la mitad o más de las muertes que provocan. Casi toda la mortalidad por dengue, parainfluenza, virus respiratorio sincitial, rotavirus y meningitis neumocócica se da en niños. Se está avanzando en la preparación industrial de dos tipos de vacunas contra la hepatitis B.



4. CANALES en Pakistán oriental, considerados fuentes de cólera. En todo el mundo en vías de desarrollo, el agua para beber o cocinar procedente de lagos, arroyos y ríos contaminados por excrementos humanos y otras fuentes de organismos infecciosos, facilita la propagación del cólera, la hepatitis, el rotavirus, la shigellosis y la fiebre tifoidea. Las condiciones higiénicas deficientes, el hacinamiento y la abundancia de insectos transmisores de enfermedades (vectores) también contribuyen. Los programas para depurar el suministro de agua potable, mejorar la sanidad, higiene y condiciones de vida y eliminar las poblaciones de vectores pueden prevenir muchas enfermedades; los programas de asistencia médica evitan, frecuentemente, las malformaciones y la muerte. No obstante ello, y según demuestran los autores de este artículo, la ampliación a corto plazo de los programas de inmunización constituye la manera menos cara y más fácil de salvar vidas.

de los cuales ya han decidido no participar en el PAI. Los laboratorios comerciales abastecen a las naciones prósperas e industrializadas y consideran necesario recuperar los gastos del desarrollo antes de plantearse la venta de sus productos a precios próximos al de coste.

Por ejemplo, los fabricantes de vacunas de los Estados Unidos, Canadá, Europa Occidental y Japón centran gran parte de su atención en mejorar el componente pertussis de la vacuna difteria-pertussis-tétanos (DPT) que, en raras ocasiones, produce convulsiones o lesiones cerebrales. Con toda seguridad, toda vacuna nueva va a ser cara (entre 10 y 100 veces más del precio actual que paga el PAI). El gasto extra, si se pudiera afrontar, no aumentaría la efectividad de la vacuna, ni cubriría nuevas poblaciones ni tampoco protegería contra otras enfermedades.

A pesar de este cuadro tan poco prometedor, la antigua estrategia de esperar a que se recuperen los costes de la investigación y el desarrollo y, entonces, comprar grandes cantidades con descuentos importantes, puede funcionar todavía con las vacunas que tienen un mercado amplio en el mundo industrializado o que poseen cierto mercado entre los viajeros. Sin embargo, puede tratarse de una espera muy larga. Cuando llegan al mercado vacunas nuevas, suelen ser caras, no sólo por la necesidad de recuperar los gastos de producción, sino también porque, frecuentemente, se emplean tecnologías nuevas -y por tanto caras- en el proceso de fabricación. Las nuevas tecnologías no son siempre fundamentales. En muchos casos, se prefieren porque permiten la obtención de una vacuna con menos efectos colaterales o resulta más eficaz; ello supone, empero, una pérdida en materia de salud pública por tratarse de un producto inaccesible para el Tercer Mundo.

Un producto que ya está en el mercado es la vacuna contra la hepatitis B. De hecho, existen dos tipos de vacunas contra la hepatitis B. Ambas son antígenos (fragmentos de un organismo que inducen la producción de anticuerpos protectores) del virus, pero una de ellas se produce por ingeniería genética y la otra mediante una técnica antigua basada en el aislamiento de antígenos del plasma sanguíneo de individuos infectados. El precio de una vacuna obtenida del plasma y fabricada en Corea según una técnica desarrollada en Nueva York viene a valer un dólar. Esa cifra es todavía ocho veces mayor que el precio de la vacuna más cara (la del sarampión), que compra actualmente el PAI, pero si la vacuna cumple los requisitos de seguridad y rendimiento que exige la OMS, el PAI puede utilizarla mientras aguarda que las vacunas de ingeniería genética, potencialmente mejores, abaraten sus precios de manera significativa. Una serie de tres dosis de la primera vacuna de ingeniería genética registrada en los Estados Unidos cuesta 130 dólares.

Las vacunas contra el SIDA y los rotavirus, en fase de investigación intensa, ya que esas enfermedades afectan a muchas personas de los países industrializados, pueden llegar también en un futuro próximo y ser asequibles algún tiempo después. Asimismo, parece factible la aparición de una vacuna contra la malaria, ya que la demanda de los viajeros procedentes del mundo desarrollado podría combinarse con la gran cantidad de sujetos expuestos en el Tercer Mundo para estimular su desarrollo comercial. De otras vacunas resulta menos probable que se produzcan o, si se producen, que sean asequibles para el Tercer Mundo; me refiero a aquellas cuya demanda por parte de los viajeros es menor (por ejemplo, las vacunas del virus del dengue o de la hepatitis A).

Por mucho que esperemos, no habrá vacunas que carezcan de mercado en los países desarrollados. En el estado actual de las cosas, según el Instituto de Medicina, cabe la posibilidad de que las empresas rechacen la producción de algunas vacunas importantes y científicamente viables por falta de mercado en los países industrializados. Entre éstas se encuentran las de la shigellosis, la lepra y las infecciones producidas por el *Streptococcus pneumoniae* (en niños) y por la *E. coli* enterotóxica (*E. coli* que produce toxinas intestinales). El mismo razonamiento es válido para las versiones mejoradas de las vacunas del sarampión, la polio, el cólera, la fiebre tifoidea, la encefalitis japonesa y la fiebre amarilla.

Por tanto, las fuerzas de mercado actúan en contra de la producción de vacunas apremiantes en el Tercer Mundo; las mismas que afortunadamente están ya en fase de producción presentan, en su mayoría, pocas posibilidades, si alguna, de convertirse en asequibles en un plazo de tiempo corto o largo. En ciertos casos, el PAI se ve obligado a considerar la compra de productos potencialmente inferiores (como la vacuna plasmática de la hepatitis B en lugar de la obtenida mediante ingeniería genética) por su precio menor. Pero ni siquiera esa posibilidad permanece siempre abierta: los fabricantes que han empleado tecno-

logías relativamente baratas para producir determinadas vacunas pueden retirar esos productos del mercado cuando introducen una versión obtenida con técnicas más avanzadas.

La situación es descorazonadora, pero no irremediable. Y merece la pena considerar al menos cuatro estrategias posibles. En la primera, que aceptaría el status quo, la ONU aumentaría su presupuesto para comprar vacunas a precios cercanos a los del mercado (en otras palabras, a los precios que incluyen los gastos de producción y los beneficios) con la esperanza de que la promesa de un mercado nuevo y lucrativo estimulara la industria para que llevara a cabo la inversión que precisa el desarrollo de nuevas y mejores vacunas. Para que este planteamiento funcionara, el PAI debería predecir el número de dosis que iba a comprar, lo que probablemente puede hacerse. La parte negativa es que la UNICEF y la OPS deberían comprometerse a comprar determinadas cantidades a los precios del mercado durante un plazo largo, un compromiso que, seguramente, no podrían mantener.

Segunda alternativa: que la ONU creara un instituto público para desarrollar y fabricar sus propias vacunas, evitando así tener que tratar con las compañías farmacéuticas. Si el instituto estuviera equipado con tecnología avanzada y en él trabajaran los mejores epidemiólogos, biólogos moleculares, bioingenieros y otros profesionales reclutados de los cuatro rincones del mundo, podrían obtenerse buenos resultados en un corto plazo.

En un instituto de esas características podrían aplicarse las tecnologías nuevas que resultaran apropiadas para las demandas sanitarias del Tercer Mundo, sin el apremio de los beneficios amortizadores de gastos. Los científicos podrían insertar genes de antígenos de diferentes bacterias y virus en un organismo transportador —como el virus de la vacuna, del que se obtenía antes la vacuna de la viruela, o el bacilo de Calmette-Guerin (BCG), que se utiliza de vacuna contra la tuberculosis— para producir vacunas capaces de proporcionar inmunidad contra una gama amplia de infecciones. Por su parte, el personal del instituto podría progresar en el desarrollo de combinados o mezclas de antígenos que inmunizaran contra varias enfermedades al mismo tiempo, facilitando una mayor protección a los niños de los países en vías de desarrollo.

Conforme se amplían los programas de salud de la ONU, aumenta la posibilidad de que la organización cree un instituto de esas características, pero los inconvenientes de esa solución son tan evidentes como sus ventajas. La creación de un centro así sería muy costosa y requeriría mucho tiempo; la política de cooperación internacional es muy estricta en ese sentido. Las dificultades con que ha tropezado la Organización para el Desarrollo Industrial de la ONU (ODINU) en su voluntad de establecer dos centros nuevos de biotecnología son ilustrativas. En los primeros cinco años no se ha presentado ni un producto nuevo. La obtención de resultados concretos en el desarrollo y producción de las vacunas, decisiva para la salud del mundo, no puede confiarse exclusivamente a la creación y puesta en marcha de un centro internacional.

Vayamos con la tercera posibilidad: establecer unidades de producción y desarrollo en países o regiones del Tercer Mundo con poblaciones grandes. Tales unidades se dedicarían a crear, desarrollar y producir vacunas contra las enfermedades habituales o más perjudiciales en su región. Es probable que esta idea resultara atractiva a las naciones participantes en el PAI, impacientes por desarrollar nuevas tecnologías. Las asociaciones para transferir tecnología son también una actividad de desarrollo típica y podrían atraer dinero que, de otra forma, no estaría disponible para los programas de vacunación.

Uno de los principales inconvenientes de esa alternativa es que el Banco Mundial y otras instituciones que podrían aportar préstamos para el establecimiento de las unidades, están cada vez más interesados en obtener beneficios sustanciosos de sus inversiones cuando financian empresas nuevas. No es probable que el desarrollo y la producción de vacunas para subvenir las necesidades sanitarias del Tercer Mundo reporte grandes beneficios.

Aunque se pudiera conseguir una financiación, tardaríase algunos años en cosechar los frutos de esta estrategia. Cualquier instituto necesita cierto tiempo para diseñar un producto, algún tiempo más para cubrir el rango de necesidades de su región y más tiempo aún para que una red de institutos atiendan las necesidades de vacunas de los países subdesarrollados.

Merece la pena, sin embargo, intentar la aplicación real de esta idea como parte de una estrategia a largo plazo. De hecho, la OPS y la Fundación Rockefeller lo han hecho ya así a pequeña

escala. Basándose en que el objetivo de la inversión en la producción regional de vacunas es el progreso de la salud pública y la ciencia, más que la obtención de beneficios, estas dos instituciones se hallan estudiando la posible creación de uno o más centros para el desarrollo y la producción de vacunas en América Latina. Si con esos centros se consigue demostrar que naciones en conflicto por otros motivos cooperan entre sí para resolver problemas sanitarios comunes, las organizaciones de ayuda internacional podrían colaborar en el establecimiento de centros similares en Africa y en Asia.

Veamos la cuarta alternativa. Es, nos parece, la manera más rápida para obtener resultados reales a corto plazo, antes del final de este siglo. Como en la primera, la ONU aportaría dinero para pagar a los fabricantes, pero esos fondos se reservarían exclusivamente para el desarrollo de las vacunas que se consideren de necesidad prioritaria en regiones extensas del Tercer Mundo. Por muchas de las razones que estimulan a los fabricantes a participar en el PAI, los institutos y compañías que desarrollen los productos los venderían al PAI a precio de coste o poco más (sin añadir los gastos del desarrollo). La ventaja de esta alternativa sobre la primera estriba en que debería aportar una cantidad limitada de dinero para cada vacuna y el PAI recibiría a cambio un compromiso a largo plazo para abastecerse de vacunas a bajo precio.

La inversión de dinero en el desarrollo de nuevas vacunas no está descartada. Ya existen mecanismos para aportar fondos a la investigación de vacunas; por ejemplo, el Banco Mundial y el Programa de Desarrollo de la ONU apoyan esa investigación. Esos mecanismos tan sólo deberían ampliarse o imitarse para mantener un programa de desarrollo de vacunas.

Por otra parte, la ONU y otras instituciones que controlan los programas internacionales de ayuda deberían tomar la difícil decisión de gastar dinero fuera del Tercer Mundo, en las naciones industrializadas, donde se encuentran la mayoría de las empresas farmacéuticas con la infraestructura necesaria para aprovechar los descubrimientos de los laboratorios y su aplicación industrial. Esa sería una condición necesaria para asegurar una producción de vacunas rápida, constante y de alta calidad. Sin embargo, con el tiempo, sería posible transferir gran parte de la tecnología resultante a las naciones en vías de desarrollo; aplicándola con las técnicas que ya manejan, podrían producir sus propias vacunas.

Hay posibilidades de que se ponga en marcha, en un breve intervalo de tiempo, la cuarta alternativa. Cierto número de laboratorios públicos y privados de primera línea, en todo el mundo, han expresado interés por acometer el desarrollo y la producción de las vacunas del PAI, previo contrato, y vender a precio casi de coste (aunque algunos fabricantes manifiestan sus dudas acerca de si el volumen de ventas será suficiente). Para determinadas compañías, un arreglo de tales características supondría una manera atractiva de ensayar nuevas técnicas con la subvención de los recursos necesarios.

Se ha discutido en la ONU la posibilidad de crear un fondo rotativo mediante el cual la fracción de desarrollo de la organización, junto a otros programas de ayudas, pagarían los costes iniciales de desarrollo. Según este plan, la UNICEF y la OPS pagarían sólo los gastos de producción de las vacunas y un pequeño recargo que serviría para reponer el fondo, de forma que pudiera continuar el desarrollo.

Cualquiera de las cuatro alternativas, o una combinación de las mismas, podría funcionar. Ha llegado el momento de instar a los organismos internacionales que aborden directamente y cuanto antes el problema de la necesidad de vacunas y convencer a los que poseen el conocimiento y la capacidad para que inviertan su capital en beneficio de los niños de todo el mundo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEW VACCINE DEVELOPMENT, ESTABLISHING PRIORITIES, VOL. 2: DISEASES OF IMPORTANCE IN DEVELOPING COUNTRIES. Committee on Issues and Priorities for New Vaccine Developme Institute of Medicine. National Academy Press, 1986.

NEW SCIENTIFIC QPPORTUNITIES AND OLD OBSTACLES IN VACCINE DEVELOPMENT. Kenneth S. Warren en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of América*, vol. 83, n.º 24, págs. 9275-9277; diciembre de 1986.

ESTABLISHING HEALTH PRIORITIES IN THE DEVELOPING WORLD. Julia Walsh. United Nations Development Program. Adams Publishing Group, 1988.

THE STATE OF THE WORLD'S CHILDREN 1988. James P. Grant, United Nations Children's Fund. Oxford University Press, 1988.

VACCINES. Stanley A. Plotkin y Edward A. Mortimer. W. B. Saunders Co., 1988.

Taller y laboratorio

La ilusión de la pared del café; hileras de azulejos que se inclinan sin moverse

Jearl Walker

Los azulejos de revestimiento, negros y blancos, rectangulares o cuadrados, provocan la ilusión de la pared del café, cuando se disponen en hileras de color alternas, divididas por finas capas de mortero. Para sorpresa del espectador, las líneas horizontales parecen converger hacia la derecha o hacia la izquierda. El sentido de esa convergencia es también alterno; en una fila, los azulejos se ensanchan hacia la izquierda y, en la fila siguiente, hacia la derecha.

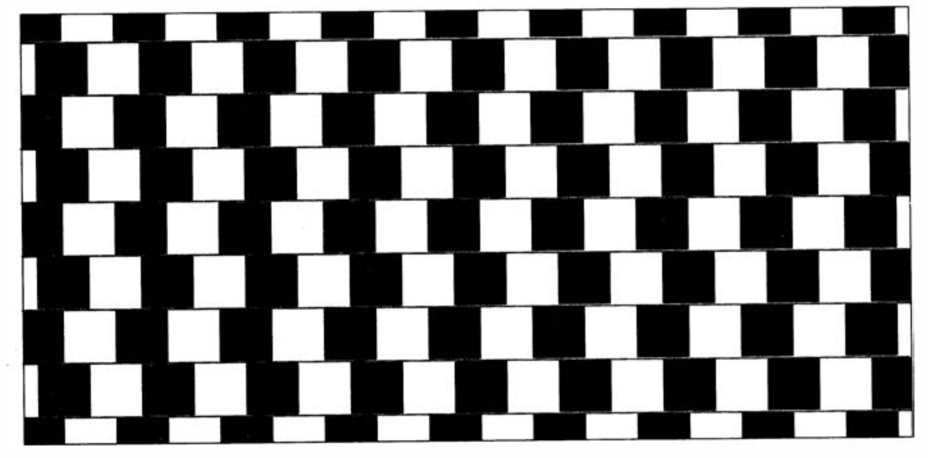
Esa ilusión ha venido llamando la atención de los expertos desde su descubrimiento, en la pared de un café de Bristol (Inglaterra), a principios de los setenta. En 1979, Richard L. Gregory y Priscilla Heard, de la Universidad de Bristol, presentaron el primer estudio del fenómeno. Lo relacionaron con una vieja ilusión, la figura de Münsterberg, así llamada en honor del psicólogo Hugo Münsterberg, quien la descubrió en 1897. En la versión de Münsterberg, los bordes superiores e inferiores de los azulejos parecen inclinados, el sentido de la inclinación es alterno de fila a fila y la convergencia no resulta tan pronunciada. Destacan, en particular, las zonas blancas que parecen ensancharse verticalmente por un extremo. Pero en ambos casos se trata de mera ilusión; no hay elementos inclinados en ninguna de las figuras. Las inclinaciones ilusorias pueden eliminarse apuntando la visual casi paralelamente al plano de la página. (Podrá, en cambio, apreciarse mejor, las ilusiones si colocamos, detrás de la página, una hoja de papel oscuro que disimule el texto impreso en la página siguiente.)

Tras Gregory y Heard otros observaron también que la ilusión de la pared del café adquiría mayor vigor si los brillos de los azulejos negros y blancos ofrecían fuertes contrastes y la capa de mortero era estrecha y de brillo moderado. Si el mortero brillaba igual que las zonas blancas, la ilusión era más débil o incluso podía no manifestarse; si brillaba aún más, no se presentaba. Cuando el mortero era tan oscuro como las zonas negras, se producía la ilusión de Münsterberg, con una convergencia menos acusada; si su oscuridad aumentaba, no se percibía convergencia. Los azulejos pueden ser de colores, y no negros y blancos, pero no hay ilusión sin contraste de brillo. Podemos escalonar azulejos idénticos, aunque la ilusión no surgirá si los ordenamos como escaques del tablero de ajedrez.

Gregory y Heard compararon estas figuras con ciertos dibujos ideados por Fraser a principios de siglo. Fraser mostró que una hilera estrecha de rayas claras y oscuras levemente inclinadas conferían la ilusión de que la inclinada era la propia hilera. Esta ilusión recibe el nombre de efecto de cordón trenzado: cada hilera de rayas parece asemejarse a dos hilos que se arrollaran en espiral uno en torno al otro. Este efecto no ha recibido todavía una explicación satisfactoria. Probablemente tiene que ver con la posible influencia de los detectores del sistema visual responsables de la determinación de las orientaciones a pequeña escala (orientaciones "locales") en la percepción de la orientación a gran escala (orientación "global"). Tal influencia parece ser más intensa cuando se contemplan muchos elementos iguales, o sólo ligeramente distintos, localmente inclinados.

¿Se debe la inclinación que se percibe en la ilusión de la pared del café a ese tipo de control que ejercen las orientaciones locales en la orientación global? Si es así, ¿cuáles serán los elementos localmente inclinados? La desalineación entre los azulejos negros y blancos de las filas contiguas podría desempeñar quizás ese papel, pero los azulejos son demasiado grandes y, además, tal explicación desatiende la condición de que el mortero aporta su particular grado de contraste. Durante mucho tiempo, los investigadores trataron de identificar alguna inclinación local que pudiera ser la creadora de la convergencia general de las filas.

Gregory y Heard sugirieron que la inclinación local se generaba cuando el sistema visual localizaba los bordes de una línea de mortero. Para contrarrestar los incesantes y leves movimientos del ojo que hacen que los bordes cambien de sitio en la retina, debe existir algún mecanismo de bloqueo que inmovilice los bordes y la imagen parezca fija. Allá donde el mortero separe azulejos del mismo color (sean blancos o negros), ese mecanismo de bloqueo delimita bien los bordes. Pero allá donde separe azulejos que contrasten y cuando el mortero introduzca un contraste intermedio, el mecanismo de bloqueo



1. Ilusión de la pared del café

puede ser menos preciso, haciendo que los bordes se desplacen ligeramente. Entonces, el sistema visual percibirá una variación periódica donde se encuentren los bordes del mortero; la línea de éste se asemejará a un cordón trenzado.

En 1979, Bernard Moulden y Judy Renshaw, de la Universidad de Reading, abordaron la ilusión de Münsterberg basándose en una idea de Hermann von Helmholtz, uno de los precursores, durante el siglo XIX, de la investigación en óptica fisiológica. Según éste, cuando una zona blanca brillante linda con una zona negra apagada, la línea de demarcación se percibe desplazada hacia la segunda, en un efecto de irradiación. Esta migración del borde podría responder del aparente brillo intenso que presenta una zona blanca rodeada de azulejos negros por tres de sus lados. El extremo opuesto, con azulejos blancos por arriba y por abajo, no sufre ese ensanchamiento ilusorio. De ese modo, la variación en las posiciones de los bordes superiores e inferiores de los azulejos blancos crearía la inclinación local.

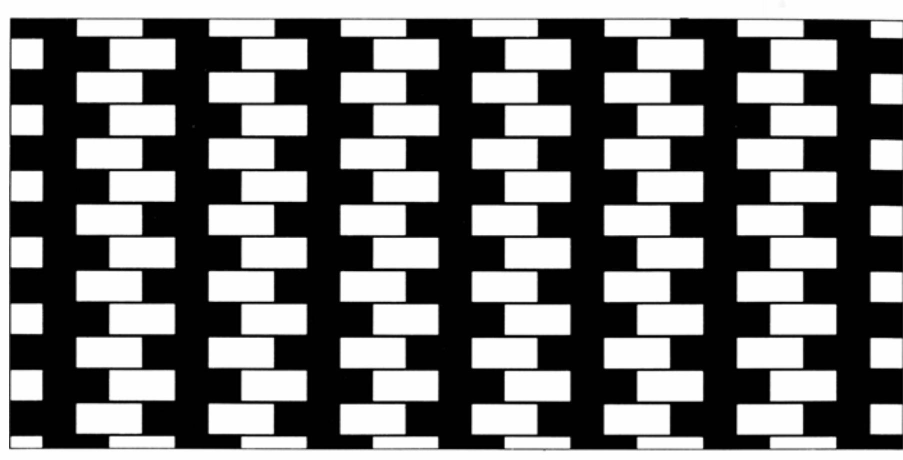
Otro planteamiento lo estableció, en 1983, Mark E. McCourt, de la Universidad de California en Santa Bárbara. Para ello, consideró el efecto de inducción de brillo, mediante el cual la alternancia horizontal entre los azulejos claros y oscuros de la pared del café altera sutilmente la brillantez aparente a lo largo de las líneas de mortero horizontales. Así, el mortero comprendido en zonas de azulejos oscuros parece brillar ligeramente y el mortero comprendido en zonas claras parece oscurecerse.

El mortero aparentemente oscurecido conecta dos azulejos oscuros a lo largo de una pendiente, mientras que el mortero brillante conecta dos azulejos claros a lo largo de una pendiente paralela. Entonces, la zona correspondiente a una línea de mortero se asemeja a un cordón trenzado.

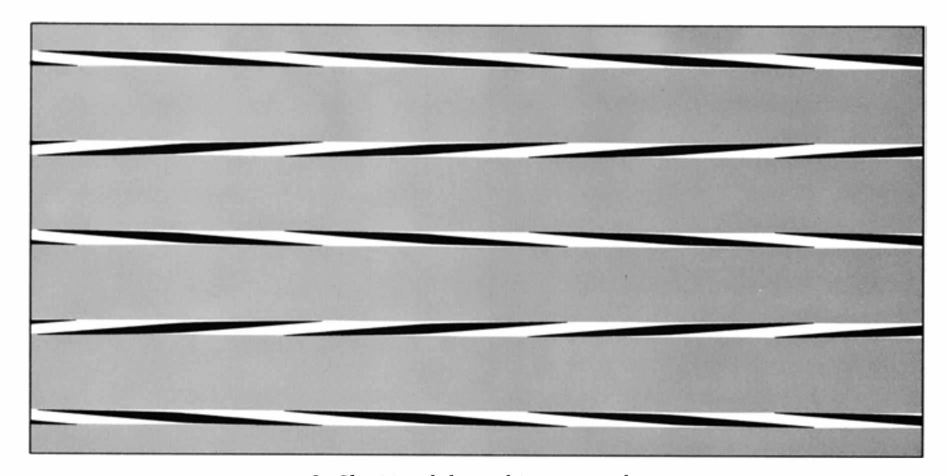
Un experimento de comprobación reveló que si las rayas de mortero se oscurecen y aclaran de tal manera que su brillo varíe periódicamente, tal como ocurre en la figura 4, la ilusión de la pared del café se hace más intensa de lo habitual. Además, si el mortero se remplaza por líneas claras y oscuras que estén inclinadas entre azulejos de igual brillo, la ilusión se refuerza aún más.

Puede que en 1986 M. J. Morgan, del Colegio Universitario de Londres, y Moulden atinaran con la mejor explicación para la ilusión de la pared del café. Se basaron para ello en un modelo de la visión humana que ha venido elaborándose en los últimos veinticinco años. En esta teoría influyó especialmente David Marr, quien fue profesor del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Esbozaré primero una versión simplificada de ese modelo, centrada en el proceso retiniano, que deja fuera los pormenores matemáticos, y retornaremos luego a la ilusión.

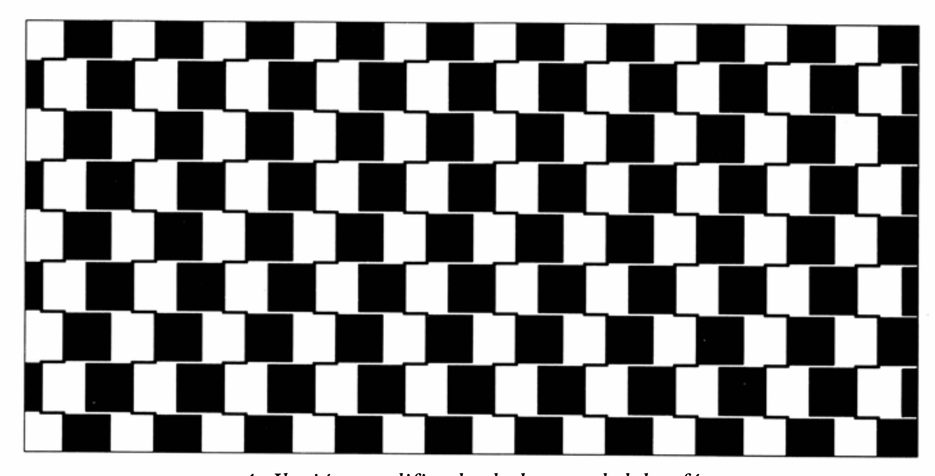
Sostenía Marr que en las primeras etapas del proceso visual se construye un "esquema fundamental tosco" de la realidad que se contempla. Este esquema carece de la riqueza que posee la escena real, aunque consta de las manchas de color, franjas, terminaciones y tramos de borde que configuran aproximadamente los objetos reales. Para construir ese esquema, el proceso visual temprano, a cargo de la retina y el



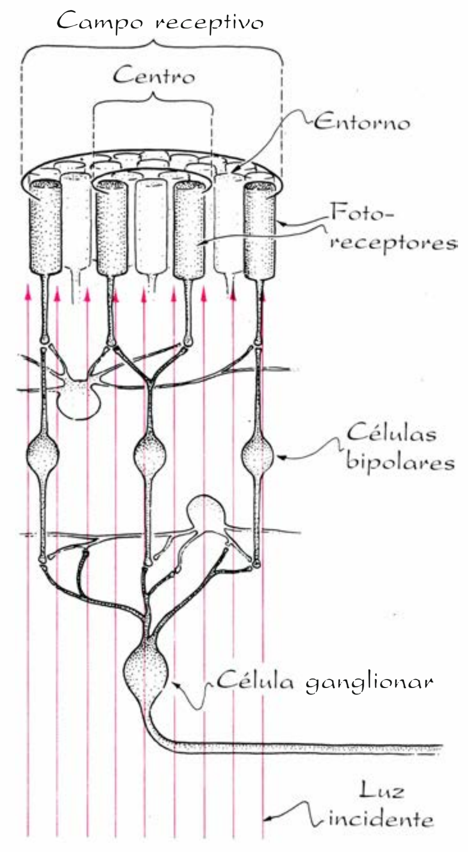
2. Ilusión de Münsterberg



3. Ilusión del cordón trenzado



4. Ilusión modificada de la pared del café



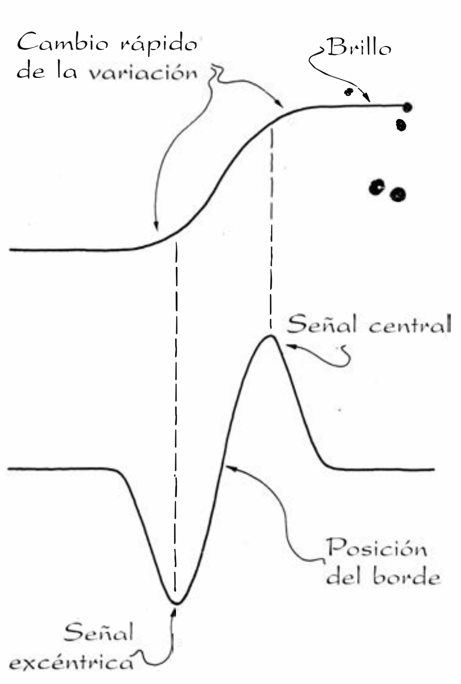
5. Diagrama simplificado de la retina

cerebro, identifica los cambios de brillo acusados que corresponden a los bordes.

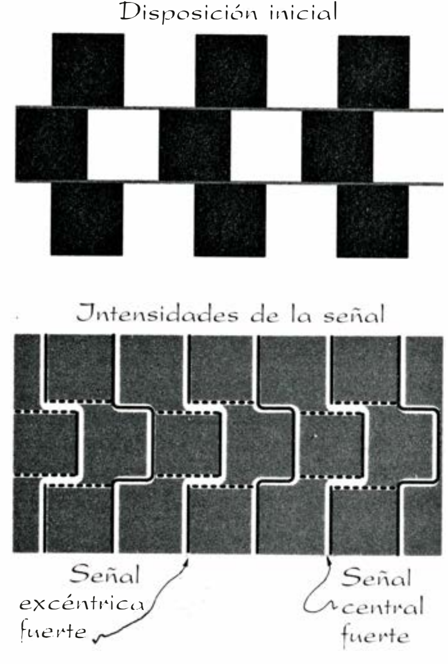
El proceso se inicia en la retina, cuando los fotorreceptores absorben fotones y envían entonces señales a las células ganglionares a través de las células bipolares [*véase la figura 5*]. Cada célula ganglionar reacciona ante un conjunto concreto de fotorreceptores repartidos sobre un pequeño círculo, que forma el campo receptor de cada célula. (En la ilustración aparecen sólo algunos fotorreceptores.) Cada campo está dividido en un centro y un entorno que reaccionan antagónicamente y determinan así la reacción neta de la célula correspondiente cuando su campo se ilumina.

La intensidad de una señal procedente de una célula ganglionar es la cadencia a la cual lanza impulsos más hacia el interior del sistema visual. La célula sin iluminar lanza impulsos lentamente, a la "cadencia de reposo". Supongamos que sólo estén iluminados los fotorreceptores del centro. Entonces, las células que llamaremos centrales aumentan su cadencia de emisión de impulsos, mientras que las células que llamaremos excéntricas cesan en su actividad. Si sólo está iluminado el entorno, los papeles se invierten, es decir, las células centrales se desactivan y las excéntricas lanzan impulsos a una cadencia mayor que la de reposo. Si el centro y el entorno están iluminados por igual, las células emiten a una frecuencia sólo un poco mayor que la de reposo.

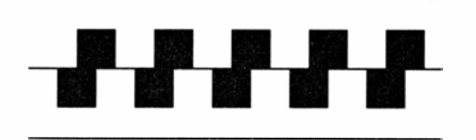
Supongamos que un borde de separación entre zonas claras y oscuras se capta de través en la retina [*véase la figura 6*]. Para la iluminación uniforme de la parte clara, las células centrales y las excéntricas emiten a su cadencia de

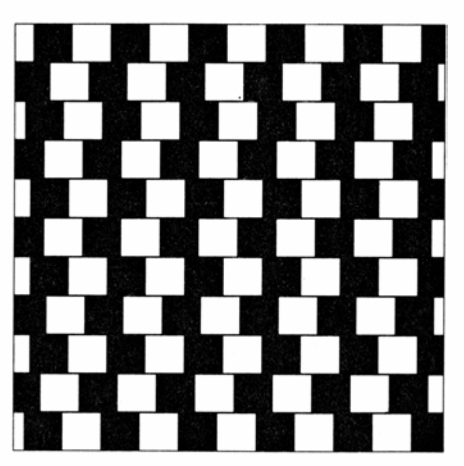


6. Señales de las células ganglionares en un borde

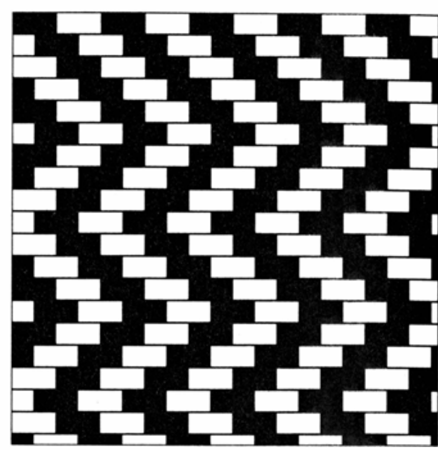


7. Intensidad de las señales de las células ganglionares





8. *Ilusiones de Münsterberg modificadas*



9. *Ilusión del jardín de infancia*

reposo o un poco más rápido. Para la parte oscura, ambos tipos celulares emiten sólo a su cadencia de reposo. Pero las células instaladas sobre el borde son más activas. Así, toda célula central cuyo centro se encuentre bajo una luz más intensa que una parte de su entorno emitirá muy activamente; lo mismo hará toda célula excéntrica cuyo centro esté iluminado más tenuemente que una parte de su entorno. Las señales emitidas por las células de ambos tipos viajan separadamente por el trayecto visual, pero acaban juntándose cuando al esquema fundamental tosco se añaden bordes orientados. Si las células centrales están activas en un lugar de la retina, mientras en un lugar próximo lo están las células excéntricas, debe haber un borde entre ambos conjuntos; éste se añade al esquema merced al mecanismo en cuestión.

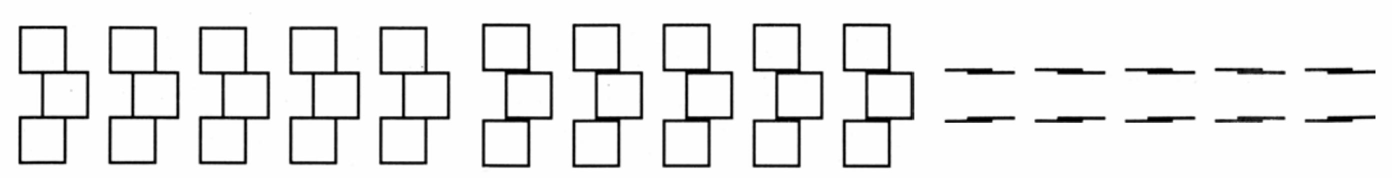
Afirmaba Marr que la señal de salida de una célula ganglionar es una medida de la rapidez con que varía el brillo de un lugar a otro del campo receptivo. Si la iluminación es uniformemente clara u oscura, o bien cambia gradualmente, las células emiten a su cadencia de reposo o sólo un poco más rápido. Pero si la iluminación sufre cambios abruptos, tal como ocurre en un borde, ciertas células son mucho más activas, a saber, las células centrales del lado claro del borde y las células excéntricas del lado oscuro. Cuando vemos una línea estrecha oscura, se detectan dos bordes, mientras que en el interior de aquélla se activan las células excéntricas, e inmediatamente fuera de la misma se activan las centrales. Cuando vemos una línea estrecha luminosa, la actividad se distribuye al revés.

Morgan y Moulden aplicaron el modelo de Marr a las ilusiones de la pared del café y de Münsterberg. Consideremos la primera con un brillo del mortero intermedio. Los interiores uniformemente claros u oscuros de los azulejos generan débiles señales en los ganglios. Esas zonas aparecen grises en la figura 7.

De los bordes de los azulejos y del mortero nacen señales más fuertes. Allí donde el mortero separa secciones brillantes de azulejo, la obscuridad relativa del mortero activa las células excéntricas. La línea de actividad excéntrica entra en conexión con los bordes de las imágenes de los azulejos obscuros, donde se generan también fuertes señales excéntricas. Estas regiones se representan en negro en la figura. Allí donde el mortero separa secciones obscuras de azulejos, el brillo relativo del mortero activa las células centrales. La línea de actividad entra en conexión con los bordes de las imágenes de los azulejos brillantes, que generan también fuertes señales centrales. Estas regiones se representan en blanco en la ilustración. (No deben tomarse exactamente como tales los grises, blancos y negros de esa ilustración. El propósito del sombreado es representar intensidades de señal; el sombreado que se percibe en realidad se añade probablemente en una etapa posterior del proceso visual.)

Adviértase en la ilustración que las zonas de señales centrales y excéntricas forman un motivo repetitivo que se asemeja a dos o tres escalones. Estos suben a la izquierda o a la derecha, formando una ordenación compuesta y levemente inclinada. Tal inclinación significa que, cuando al "esquema fundamental tosco" se añaden los bordes, éstos aparecen levemente inclinados a lo largo de la línea del mortero. La repetición significa que la inclinación local genera una inclinación global, igual que en el efecto de cordón trenzado. La ilusión se manifiesta, no porque en la figura haya una inclinación local, sino porque las señales procesadas hacen que el "esquema fundamental tosco" parezca proceder de elementos inclinados.

Quizás el lector halle algo rebuscada esta explicación, pero lo cierto es que da cuenta perfecta de la dependencia de la ilusión con respecto al brillo del mortero. Si éste luce igual que los azulejos claros, faltará la señal excéntrica procedente de los lugares donde el mortero separa tales azulejos, por cuyo motivo será más débil la semejanza entre las imágenes procesadas por los ganglios y la figura del cordón trenzado. Si el mortero brilla más, esas regiones poseerán unas señales centrales fuertes y no se manifestará ilusión alguna.



10. *Ilusión de Taylor y Woodhouse*

Si el mortero es tan obscuro como los azulejos obscuros, la ilusión de convergencia es más débil y quizá ni siquiera se presente, puesto que no hay señales centrales procedentes de los lugares donde el mortero separa azulejos obscuros. Si el mortero es aún más obscuro, en la línea de separación se generarán señales excéntricas y la ilusión no hará, desde luego, acto de presencia.

La irradiación que se ve en la ilusión de Münsterberg puede además contener otro artificio resultante de la posición de los bordes. En 1984, Morgan, Moulden, G. Mather, del Colegio Universitario de Londres, y R. J. Watt, de Reading, sugirieron que la irradiación se debía a una respuesta no lineal a la luz en el primer trecho del sistema visual. Aunque su asentamiento no quedó especificado, se trata presumiblemente de los fotorreceptores, las células bipolares o sus innumerables interconexiones. La expresión "no lineal" significa que, si la intensidad de la luz sufre un pequeño incremento, el cambio correspondiente en la reacción del sistema visual diferirá según la luz sea tenue o fuerte. Esta reacción no lineal altera la "medición" que realizan las células ganglionares de la rapidez con que varía el brillo en su campo receptivo; en consecuencia, el borde parece estar levemente desplazado hacia la zona oscura.

Hay diversas variantes de la ilusión de Münsterberg, de las cuales, en la figura 8, se representan las dos que, en 1978, publicó R. H. Day, de la Universidad de Monash, Australia. La primera es una versión simplificada de la ilusión, en que la línea central aparenta estar inclinada con respecto a las líneas superior e inferior, aunque éstas son, en realidad, paralelas a ella. En la segunda versión, el desalineamiento de los azulejos parece variar de una fila a otra.

Day publicó, asimismo, un dibujo más antiguo, que se ilustra en la figura 9 y produce la llamada ilusión del jardín de infancia. Añadió entonces una nota acerca de una observación no publicada de Gregory, quien señaló que, aunque el dibujo del jardín de infancia se asemeja al de Münsterberg, cuando ambos se construyen con azulejos de colores igualmente brillantes, el primero da todavía cierta impresión de convergencia; no así el segundo. Acaso haya algún otro mecanismo que desempeñe un papel en la potente ilusión del jardín de infancia.

Otro fenómeno de convergencia ilusoria fue dado a conocer, en 1980, por Steve P. Taylor y J. Margaret Woodhouse, de Cardiff, Gales [*véase la figura 10*]. Cuando una misma línea hace de borde entre dos contornos cuadrados contiguos, no aparece ninguna ilusión [*izquierda*], pero cuando los bordes contiguos están formados por dos líneas distintas, se produce una impresión de convergencia [*centro*]. Se representa también una versión simplificada [*derecha*]; el dibujo se asemeja a una figura trenzada, pese a que no haya elementos explícitamente inclinados. He descubierto que tan escuetos diseños exhiben inclinación (con respecto a líneas largas y paralelas, colocadas de cualquier modo), aun cuando se dispongan en columna o al azar sobre una página. En 1985, Paola Bressan, de la Universidad de Padua, demostró que la ilusión de convergencia desaparecía si las líneas de la versión simplificada pecaban por defecto (muy finas) o por exceso (muy gruesas).

Mi opinión es que la ilusión debe guardar relación con la manera en que las líneas quedan impresas en el "esquema fundamental tosco". Si son demasiado finas, quedan representadas por líneas horizontales; si demasiado gruesas, sus detalles quedan representados más fielmente con unos bordes que retienen su estructura horizontal; pero si son de una anchura intermedia, quedan representadas por barras inclinadas que se aproximan a su forma sin más detalles. Estos se añaden posteriormente, de modo que terminamos por percibir sólo las líneas apiladas, aunque subsiste la impresión de inclinación.

Como entretenimiento, sugiero al lector que busque ilusiones en paredes de azulejos, diseños gráficos y piezas de arte moderno. Podríamos investigar, dicho sea de paso, cuántas veces sería necesario rehacer un diseño gráfico, o rediseñar una pared de azulejos, para que parecieran correctos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BORDER LOCKING AND THE CAFÉ WALL ILLUSION. Richard L. Gregory y Priscilla Heard en *Perception,* vol. 8, págs. 365-380; 1979.

VISION: A COMPUTATIONAL INVESTIGATION INTO THE HUMAN REPRESENTATION AND PROCESSING OF VISUAL INFORMATION. David Marr. W. H. Freeman and Company, 1982. (Traducción española en Alianza Editorial, Madrid.)

THE MÜNSTERBERG FIGURE AND TWISTED CORDS. M. J. Morgan and B. Moulden en *Vision Research*, vol. 26, n.º 11, págs. 1793-1800; 1986.

FURTHER STUDIES OF THE CAFÉ WALLAND HOLLOW SQUARES ILLUSIONS. J. Margaret Wooddhouse y Steve Taylor en *Perception*, vol. 16, págs. 467-471; 1987.

Juegos de ordenador

Creación y ruptura de códigos. Segunda parte

A. K. Dewdney

"Lo que se haya codificado en una máquina resultará tanto más fácilmente descodificable en otra."

—Andrew Hodges, *Alan Turing: La Enigma*

Hasta la segunda guerra mundial, la ocultación de mensajes por medio de códigos y cifras constituía una operación tediosa que se realizaba a mano. Durante la contienda, la tarea se encomendó a máquinas electromecánicas, como la Enigma alemana. En nuestros días, la codificación se realiza por medio de ordenadores. Los ordenadores son capaces de embrollar rápidamente mensajes dados en lenguaje ordinario (llamados texto llano) de acuerdo con una "clave secreta" y, convertidos ya en texto cifrado, transmitirlos por teléfono o a través de otros enlaces de comunicaciones electrónicas. Otros ordenadores, provistos de la misma clave, descodifican y desembrollan no menos velozmente el texto cifrado. En cualquier caso, tal es la idea que subyace a la DES (Data Encryption Standard, norma de cifrado de datos), un método normalizado para la transmisión de datos en clave propuesto en 1977 por la oficina estadounidense de pesos y medidas y que en la actualidad utilizan los sistemas de comunicaciones comerciales y, posiblemente, los militares.

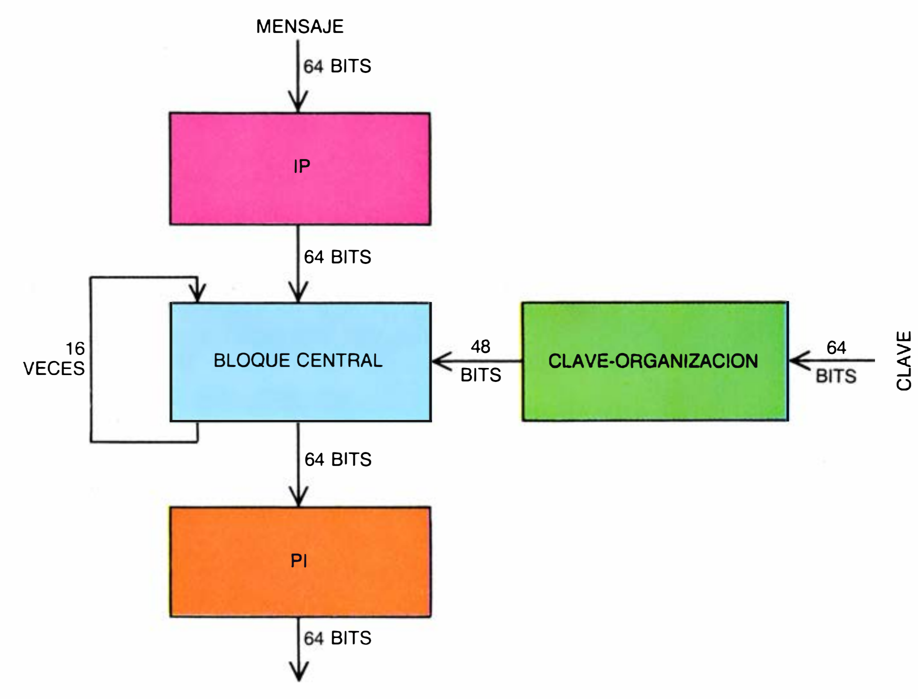
Presentaré en las páginas siguientes una descripción completa de la DES que, sea dicho de paso, constituirá la más pública de sus apariciones hasta la fecha. Puedo darla a conocer sin reserva alguna, porque la seguridad de cualquier texto cifrado generado por la DES depende por entero de que su clave asociada se guarde en secreto. Empero, los últimos avances en criptología, que es la ciencia de la creación y ruptura de cifrados y códigos, se han centrado en claves que son parcialmente públicas y en parte privadas: se entierra una clave privada en un problema conocido que el público no puede resolver.

A despecho de qué sea de dominio público y qué se mantenga secreto, todo sistema criptográfico informatizado se construye en torno a un algoritmo de codificación y un algoritmo de descodificación. El de codificación de la DES se concibió y diseñó en la Corporación de Investigación y Desarrollo de IBM. Al igual que la máquina Enigma descrita en el artículo del mes pasado, la DES se vale de una secuencia de operaciones para embrollar el texto, operaciones que individualmente son bastante sencillas, pero colectivamente complicadas. En la máquina Enigma, las operaciones componentes corrían a cargo de ruedas dentadas mecánicas; en la DES las realizan por "módulos" de programación o bien micropastillas especiales.

Al intervenir ordenadores en el proceso de codificación, los símbolos que se permutan y trastocan no son letras del alfabeto (como era el caso del código Enigma), sino dígitos binarios, es decir, bits. La norma de cifrado de datos manipula cada vez una ristra de sólo 64 bits. Por tanto, para aplicar el algoritmo es preciso traducir primero el texto llano a ristras de 64 bits. Funcionará cualquier convenio que se adopte para convertir en ristras de bits los mensajes dados en lenguaje ordinario. Por ejemplo, dado que bastan cinco bits para contar hasta 31 en base 2, se pueden utilizar las representaciones en base 2 de los números de 0 a 25 para denotar 26 caracteres alfabéticos distintos. Tal proceder permitiría representar doce letras contiguas de texto español mediante una ristra de 64 bits (y todavía nos sobrarían cuatro bits).

Podemos visualizar un mensaje en texto llano que se esté codificando por la DES como si fuera un río que se escinde y subdivide de forma complicada en grado sumo. La verdad es que la mejor forma de seguirle el rastro a esas operaciones es ayudarse de un diagrama de flujo [*véase la figura 1*]. Cada módulo semeja una cascada batida por las aguas del código hasta grado casi inconcebible. En su pedregoso camino hacia el canal de salida, las ristras de 64 bits de texto llano se encuentran con tres tipos de módulos: de permutación, de desplazamiento hacia la izquierda y de sustitución. Cabe resumir pulcramente mediante tablas las operaciones efectuadas por cada tipo de módulo.

Una tabla de permutación indica cómo ha de alterarse el orden de los bits de una ristra mediante un módulo de permutación determinado. Un ejemplo sencillo muestra la forma de leer esas tablas. Supóngase que un módulo de permutación opere sobre la ristra binaria 1011 según la siguiente tabla



1. Esbozo de la Norma de Codificación de Datos (DES)

IP	E	PC1	PC2	P	PI	
58	32	57	14	16	40	1
50	1	49	17	7	8	2
42	2	41	11	20	48	3
34	3	33	24	21	16	4
26	4	25	1	29	56	5
18	5	17	5	12	24	6
10	4	9	3	28	64	7
2	5	1	28	17	32	8
60	6	58	15	1	39	9
52	7	50	6	15	7	10
44	8	42	21	23	47	11
36	9	34	10	26	15	12
28	8	26	23	5	55	13
20	9	18	19	18	23	14
12	10	10	12	31	63	15
4	11	2	4	10	31	16
62	12	59	26	2	38	17
54	13	51	8	8	6	18
46	12	43	16	24	46	19
38	13	35	7	14	14	20
30	14	27	27	32	54	21
22	15	19	20	27	22	22
14	16	11	13	3	62	23
6	17	3	2	9	30	24
64	16	60	41	19	37	25
56	17	52	52	13	5	26
48	18	44	31	30	45	27
40	19	36	37	6	13	28
32	20	63	47	22	53	29
24	21	55	55	11	21	30
16	20	47	30	4	61	31
8	21	39	40	25	29	32
57	22	31	51		36	33
49	23	23	45		4	34
41	24	15	33		44	35
33	25	7	48		12	36
25	24	62	44		52	37
17	25	54	49		20	38
9	26	46	39		60	39
1	27	38	56		28	40
59	28	30	34		35	41
51	29	22	53		3	42
43	28	14	46		43	43
35	29	6	42		11	44
27	30	61	50		51	45
19	31	53	36		19	46
11	32	45	29		59	47
3	1	37	32		27	48
61		29			34	49
53		21			2	50
45		13			42	51
37		5			10	52
29		28			50	53
21		20			18	54
13		12			58	55
5		4			26	56
63					33	57
55					1	58
47					41	59
39					9	60
31					49	61
23					17	62
15					57	63
7					25	64

2. Tablas de permutación utilizadas en la DES

(horizontal): 3 1 2 4. La tabla denota que el tercer bit de la ristra ha de pasar a la primera posición, que el primero ha de pasar a la segunda, el segundo a la tercera y que, el último bit, se mantiene en la última posición. Por tanto, al aplicar la tabla al número 1011, éste se permuta a 1101.

La DES utiliza varias tablas de permutación: la llamada de permutación inicial (IP), la tabla E de selección de bit (E), un par de tablas de elección permutada (PC1 y PC2), la tabla de permutación (P) y la tabla de permutación inversa (PI). La figura 2 las recoge.

Algunas de las tablas no contienen 64 entradas, porque sus ristras de entrada o salida tienen menos de 64 bits. El módulo E de selección de bit, por ejemplo, acepta una ristra de 32 bits y la amplía hasta una ristra de 48. La inspección de la tabla asociada revela, como era de esperar, que algunas entradas figuran más de una vez. Los módulos de elección permutada, PC1 y PC2, ejercen el efecto opuesto: contraen las ristras que pasan a su través; por tanto, en las tablas correspondientes faltan algunas de las entradas.

Los criptólogos de salón podrán transferir las tablas y la propia DES a sus ordenadores, pero tendrán que arreglarse sin apenas ayuda por mi parte. Dado que ando apretado de espacio en el artículo de este mes, sólo mencionaré que las sentencias de asignación a utilizar con las tablas de permutación son de la forma

$$T(k) \leftarrow M(P(k)),$$

donde la tabla M contiene los bits de la ristra a permutar, la tabla P contiene la tabla, T es una tabla provisional y k va descontando las nuevas posiciones de los bits. Resulta posible así programar el ordenador para que sitúe la $P(k)$-ésima entrada de M en la k-ésima posición de T. Efectuadas todas las entradas en T, puede hacerse M igual a T.

La DES pone los mensajes bajo llave convirtiéndolos en texto cifrado mediante una clave secreta: una ristra arbitraria de 64 bits que el usuario de la DES proporciona al llamado módulo clave-organización al principio del proceso de codificación. Podemos imaginar la clave como un río tributario de 64 bits, que se estrecha a 56 bits en el módulo PC1, se divide en dos cursos de 28, que se reúnen después en el módulo PC2, y se incorporan al río principal de mensaje en forma de 16 riachuelos de 48 bits, uno para cada principal iteración de la DES.

Mientras se encuentran en la unidad de clave-organización, los dos cursos de 28 bits tropiezan también con corrientes transversales, que mueven sus bits hacia la izquierda. Como podemos ver en la tabla de lo alto de la figura 3, en las iteraciones primera, segunda y novena la DES imprime a los bits de las ristras un corrimiento hacia la izquierda de paso un bit. En los demás casos, las ristras se mueven dos bits en el mismo sentido.

La programación de esos desplazamientos es sencilla. Uno a uno, los 28 bits de un segmento de clave se asignan a una tabla provisional, de tal modo que el i-ésimo elemento de la matriz provisional tome el valor del $(i + 1)$-ésimo o del $(i + 2)$-ésimo bit del segmento. Por supuesto, es preciso igualar el último elemento (o los dos) de la tabla provisional al primero (o los dos primeros) de los bits de la clave.

La DES dispone asimismo de ocho submódulos de sustitución, cada uno de los cuales convierte una ristra de seis bits en otra de cuatro. Los bits del número sometido a conversión le dicen a uno qué índices de fila y de columna ha de consultar en las tablas correspondientes: los bits primero y último determinan el índice de fila y, los cuatro bits centrales, el índice de columna [*véase la figura 3*]. Por ejemplo, el número 111010, que tiene seis bits, determina un índice de fila 10 (compuesto por los dos bits más exteriores) y un índice de columna 1101 (los interiores). Esos números binarios representan, respectivamente, a los decimales 2 y 13. La entrada de la tabla S1 correspondiente a la fila 2 y columna 13 es el número decimal 10. Se da la circunstancia de que, en forma binaria, el número decimal 10 se expresa 1010, que sería la salida del módulo S1 en el caso de que se le proporcionase como entrada 111010. (Casi todos los criptólogos de salón necesitarán dos procedimientos de conversión al objeto de convertir un número binario en decimal, y recíprocamente.)

Y basta ya de piezas y tornillos. ¿Cómo encajan entre sí? Una ristra de 64 bits entra en el módulo PI y se permuta según describe la tabla correspondiente del módulo. Pasa entonces al bloque central, donde el algoritmo principal de codificación la bate y revuelve sin esperanza de recomposición en una especie de remolino recirculante, tras lo cual pasa al módulo de PI, donde se permuta una vez más atendiendo a una tabla que es la inversa de la tabla de IP.

El bloque central no sólo acepta como entrada la salida del módulo de IP, sino también las claves de 48 bits (numeradas de 1 a 16) que se han deducido en módulo de clave-organización a partir de la clave de 64 bits que se le ha suministrado. Las mismas operaciones básicas se realizan 16 veces en el bloque central, pero cada vez con una clave de 48 bits diferente. Específicamente, la ristra de 64 bits proce-

dente del módulo IP se escinde en mitades izquierda y derecha de 32 bits. A continuación, se combina en el módulo llamado F una copia de la mitad derecha con la clave 1. El resultado se suma módulo 2 a la mitad izquierda. (La adición módulo 2 es igual que la adición ordinaria salvo en que 1 más 1 dan 0.) Los 32 bits de la suma y los 32 bits de la mitad derecha primitiva intercambian entonces sus lugares para la iteración siguiente (esta vez con la clave 2), convirtiéndose la suma en la mitad derecha de una ristra de 64 bits y, la mitad derecha, en la mitad izquierda. Cumplidas 16 de esas mezclas e intercambios, se ensamblan de nuevo las dos ristras de 32 bits para formar un total de 64 bits.

El funcionamiento del módulo F merece un diagrama propio [*véase la figura 5*]. Una copia de la mitad derecha de la ristra de 64 bits que se está procesando en ese momento penetra en el módulo E de selección de bit, donde se amplía hasta 48 bits. Seguidamente se suma módulo 2 a la clave de 48 bits apropiada para el número de iteración en curso. A partir de ahí, los 48 bits se separan en forma de otros tantos riachuelos en ocho partes iguales de seis bits cada una. Las partes fluyen a través de los módulos de sustitución S1 a S8, donde se reduce cada una de ellas a números de cuatro bits. Así, cuando los ocho riachuelos vuelven a unirse para formar una sola corriente, el tamaño total de la ristra se ha contraído a 32 bits. En ese punto, el módulo P vuelve a batir la ristra una vez más.

Los lectores que hayan tenido el valor de seguir la explicación seguramente estarán preguntándose cómo se recuperará el mensaje en texto llano a partir del texto cifrado tras la turbulenta mezcolanza a que lo ha sometido la DES. ¿Resultará tan difícil como lograr que el agua fluya cuesta arriba? La verdad es que ese es el truco: efectuar en marcha atrás las principales operaciones del bloque central. Tras dirigir a través del módulo de IP una ristra de 64 bits (como se hace al proceder a la codificación), se establece que la ristra recorra en orden inverso las 16 iteraciones en orden inverso, desde el fondo de la cascada de mezcla e intercambio del bloque central hacia lo alto. También es preciso alimentar en orden inverso los bits de la clave en la clave-organización. Tras otra permutación a cargo del módulo PI, el mensaje original debería brotar cual géiser.

¿Resulta la DES verdaderamente segura? Algunos afirman que no. Antes incluso de que se publicase la norma, Whitfield Diffie y Martin E. Hellman, de la Universidad de Stanford, advirtieron que la DES sería vulnerable a un asalto criptológico "por fuerza bruta" efectuado por una organización de grandes recursos que dispusiera de ordenadores de procesamiento en paralelo con capacidad para ensayar unos 10.000 millones de claves por segundo.

Otro de los puntos débiles de la DES es la necesidad de distribuir claves secretas entre remitentes y destinatarios, pues siempre cabe la posibilidad de que un agente hostil se las arregle para hacerse con una copia de la clave y la utilice para descodificar los mensajes. Por esa razón, Diffie y Hellman propusieron hace 12 años la distribución de claves "públicas" entre los miembros de la red de comunicaciones.

El esquema de distribución de claves públicas se funda en un número primo muy grande, p, y en un número base, a. El número a se elige a propósito de modo que a^n módulo p (donde n recorre los valores 0, 1, 2, ...) proporcione todos los valores comprendidos entre 1 y $p - 1$. Todos los miembros de la red de comunicaciones conocen los números p y a, y cada miembro ha de comunicar una clave, que figurará en el "listín telefónico" de usuarios de la red. Una usuaria, la miembro i, por ejemplo, selecciona una "semiclave" personal, x_i, que guarda bien segura en su caja fuerte. Seguidamente, computa el número k_i dado por la ecuación

$$k_i = a^{x_i} (\text{mod } p)$$

y lo envía, para que se publique junto a su nombre en el directorio o listín de la red. Todos los miembros hacen otro tanto.

Si el abonado j desea comunicarse secretamente con i, consulta en el listín el número k_i y utiliza su clave propia y particular, x_j, para calcular la clave combinada k_{ij}, que se computa elevando k_i a la potencia x_j, módulo p. Así:

$$k_{ij} = k_i^{x_j} (\text{mod } p).$$

NUMERO DE LA ITERACION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
PASO DEL DESPLAZAMIENTO	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1

	FILA	COLUMNA 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S1	0	14	4	13	1	2	15	11	8	3	10	6	12	5	9	0	7
	1	0	15	7	4	14	2	13	1	10	6	12	11	9	5	3	8
	2	4	1	14	8	13	6	2	11	15	12	9	7	3	10	5	0
	3	15	12	8	2	4	9	1	7	5	11	3	14	10	0	6	13
S2	0	15	1	8	14	6	11	3	4	9	7	2	13	12	0	5	10
	1	3	13	4	7	15	2	8	14	12	0	1	10	6	9	11	5
	2	0	14	7	11	10	4	13	1	5	8	12	6	9	3	2	15
	3	13	8	10	1	3	15	4	2	11	6	7	12	0	5	14	9
S3	0	10	0	9	14	6	3	15	5	1	13	12	7	11	4	2	8
	1	13	7	0	9	3	4	6	10	2	8	5	14	12	11	15	1
	2	13	6	4	9	8	15	3	0	11	1	2	12	5	10	14	7
	3	1	10	13	0	6	9	8	7	4	15	14	3	11	5	2	12
S4	0	7	13	14	3	0	6	9	10	1	2	8	5	11	12	4	15
	1	13	8	11	5	6	15	0	3	4	7	2	12	1	10	14	9
	2	10	6	9	0	12	11	7	13	15	1	3	14	5	2	8	4
	3	3	15	0	6	10	1	13	8	9	4	5	11	12	7	2	14
S5	0	2	12	4	1	7	10	11	6	8	5	3	15	13	0	14	9
	1	14	11	2	12	4	7	13	1	5	0	15	10	3	9	8	6
	2	4	2	1	11	10	13	7	8	15	9	12	5	6	3	0	14
	3	11	8	12	7	1	14	2	13	6	15	0	9	10	4	5	3
S6	0	12	1	10	15	9	2	6	8	0	13	3	4	14	7	5	11
	1	10	15	4	2	7	12	9	5	6	1	13	14	0	11	3	8
	2	9	14	15	5	2	8	12	3	7	0	4	10	1	13	11	6
	3	4	3	2	12	9	5	15	10	11	14	1	7	6	0	8	13
S7	0	4	11	2	14	15	0	8	13	3	12	9	7	5	10	6	1
	1	13	0	11	7	4	9	1	10	14	3	5	12	2	15	8	6
	2	1	4	11	13	12	3	7	14	10	15	6	8	0	5	9	2
	3	6	11	13	8	1	4	10	7	9	5	0	15	14	2	3	12
S8	0	13	2	8	4	6	15	11	1	10	9	3	14	5	0	12	7
	1	1	15	13	8	10	3	7	4	12	5	6	11	0	14	9	2
	2	7	11	4	1	9	12	14	2	0	6	10	13	15	3	5	8
	3	2	1	14	7	4	10	8	13	15	12	9	0	3	5	6	11

3. *Tablas de movimientos a la izquierda* (arriba) *y de sustitución* (abajo)

Sabedora de que j le ha enviado un mensaje, la abonada i procede análogamente a calcular la clave k_{ji} elevando k_j al exponente x_i y tomando el resultado módulo p. Disfruten un rato los lectores comprobando que ambos miembros utilizan en realidad la misma clave, es decir, que k_{ij} es igual a k_{ji}.

Un tercer individuo curioso o fisgón podría abrirse paso en un sistema de clave pública si lograse resolver el problema del logaritmo discreto con rapidez razonable. Si el número y de la fórmula

$$y = a^x (\mathrm{mod}\ p)$$

recibiese el nombre de potencia discreta de a, entonces x podría llamarse logaritmo discreto de y en base a. El problema del logaritmo discreto nos pide, sencillamente, hallar x conociendo y, a y p.

¿Habrá un método más rápido que el simple tanteo de todos los posibles valores de x elevando cada vez a a esa potencia módulo p y comparando el resultado con y? Los teóricos opinan que no, pero nadie ha podido demostrar que estén en lo cierto. Si el problema del logaritmo discreto resulta en verdad tan intratable como parece, bastaría tomar un valor de x bastante grande, un valor, por ejemplo, de algunos centenares de cifras, para desanimar a los merodeadores informáticos.

Diffie y Hellman ampliaron su esquema de distribución de clave pública hasta darle carácter de criptosistema de clave pública, imaginando una clase especial de función llamada "trampilla de dirección única". He aquí cómo funciona. El miembro i de una red de comunicación selecciona al azar un entero arbitrario, k_i, que será su clave particular, y publica en una guía de acceso público su particular algoritmo de cifrado, E_i. Formula asimismo otro algoritmo para la descodificación, D_i, que también ha de conservar secreto. El miembro j hace otro tanto, dando a conocer su algoritmo de codificación, E_j, y conservando secretos tanto su número especial, k_j, como el algortimo D_j que utiliza para la descodificación.

Posteriormente, cuando el miembro j envíe un mensaje confidencial al miembro i, le bastará consultar en la guía el algoritmo de codificación, E_i, de la destinataria y utilizarlo para cifrar el mensaje llano, m. En dos palabras, j transmite un texto cifrado y donde

$$y = E_i(m).$$

A la abonada i le resulta fácil la descodificación del mensaje aplicando a y su algoritmo de descodificación D_i.

Tal criptosistema depende decisivamente de la existencia de algoritmos de codificación que computen funciones "de dirección única", de modo que el conocimiento de E_i no dé indicación alguna conducente al descubrimiento de D_i. El sistema ofrecía unas perspectivas maravillosas, y ello a pesar de que cuando Diffie y Hellman propusieron el sistema no se conocían funciones de dirección única.

Entonces entró en escena el criptosistema RSA, sigla derivada de Ronald Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman, quienes desarrollaron en 1978 el procedimiento que sigue considerándose el criptosistema de clave pública con mayores probabilidades de éxito. En el criptosistema RSA, cada miembro de la red de comunicaciones selecciona dos números primos y un exponente codificador. La abonada i, por ejemplo, selecciona los números primos p_i y q_i, así como un exponente codificador, e_i. A continuación publica el producto $n_i = p_i \times q_i$ y su algoritmo de codificación, que transforma un mensaje numérico m como sigue:

$$E_i(m) = m^{e_i}(\mathrm{mod}\ n_i).$$

La miembro i formula también su particular algoritmo de descodificación,

$$D_i(x) = x^{d_i}(\mathrm{mod}\ n_i).$$

Se da la circunstancia de que el algoritmo D_i deshace exactamente el trabajo del algoritmo E_i. Los dos algoritmos se utilizan en la forma precisa contemplada por Diffie y Hellman en su criptosistema de clave pública. ¿Por qué funciona? ¿Cómo obtiene el miembro i el número d_i?

Resulta fácil computar el número red de comunicaciones.
1) $\times$ $(q_i - 1)$. Para hallarlo, se resuelve la ecuación modular $e_i \times d_i(\mathrm{mod}\ f_i) = 1$. Dicho de otro modo, el producto de d_i por e_i tiene que ser igual a un múltiplo de f_i incrementado en una unidad. Además, e_i y f_i han de ser primos entre sí: no pueden tener más divisor común que el 1.

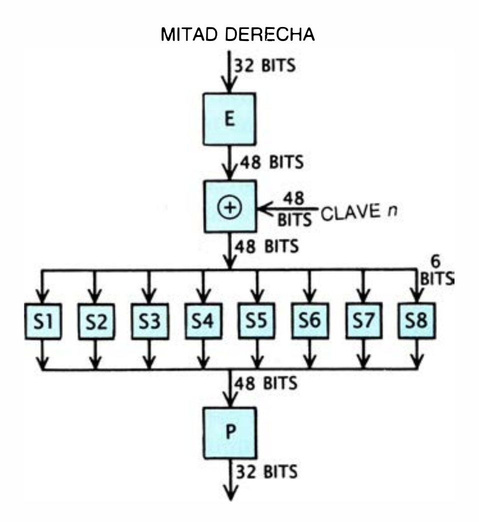
Por consiguiente, cuando la miembro i recibe un mensaje codificado en su propio algoritmo, E_i, recibe de hecho un mensaje m en la forma

$$m^{e_i}(\mathrm{mod}\ n_i).$$

Si procede a elevar esta expresión a la potencia d_i, forma

$$m^{e_i \times d_i}(\mathrm{mod}\ n_i).$$

4. Versiones ampliadas del bloque central (izquierda) *y del bloque clave-organización* (derecha)



5. Versión ampliada del módulo F

Como acabo de mencionar, el nuevo exponente de m, $e_i \times d_i$, es igual a un múltiplo de f_i incrementado en una unidad. Por otra parte, según un teorema de Euclides, un número elevado a la suma de un múltiplo f_i más uno, módulo n_i equivale exactamente al propio número: ¡el texto llano se nos revela así, desnudo, a la luz deslumbrante de la matemática!

La cuestión de si el criptosistema RSA puede descerrojarse tiene respuesta similar a la del sistema de clave pública. Si alguien lograse idear un algoritmo de factorización verdaderamente rápido, capaz de descomponer números compuestos muy grandes en sus componentes primos, la fractura del criptosistema RSA no ofrecería grandes dificultades. Tan pronto se publicara n_i, al fisgón informático le bastaría descomponerlo en los factores p_i y q_i, mediante los cuales descodificaría cualquier texto cifrado que enviara la miembro i. No obstante, los especialistas en teoría de números están convencidos de que ese tipo de factorización podría constituir uno de los problemas destinados a resultar eternamente intratables.

Por apreturas de espacio, los comentarios relativos al artículo de septiembre aparecerán en la sección del próximo mes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DATA ENCRYPTION STANDARD. National Bureau of Standards, Federal Information Processing Standards Publication 46. National Technical Information Service, 1977.

THE FIRST TEN YEARS OF PUBLIC-KEY CRYPTOGRAPHY. Whitfield Diffie en *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, n.º 5, págs. 560-577; mayo de 1988.

Libros

Arqueoestadística, genética molecular y las biociencias en el siglo pasado

C. M. Cuadras, J. R. Medina, L. Alonso y E. Balaguer

MATEMÁTICAS PARA ARQUEÓLOGOS, por Clive Orton. Alianza Editorial; Madrid, 1988.

He aquí un libro cuya lectura puede recomendarse tanto a un matemático como a un arqueólogo. El primero constatará que conceptos matemáticos fundamentales (función, retículo, asociación, proyección, etc.) tienen aplicación e incluso interpretación arqueológica. El segundo comprobará que las ideas matemáticas no sólo son útiles como herramientas, sino que también permiten ordenar las ideas y sugerir modelos arqueológicos. La dualidad arqueología-matemáticas está presente en toda la obra. Como dice el autor, "la finalidad perseguida a lo largo del libro es demostrar que las ideas matemáticas se encuentran en el meollo de muchos conceptos e ideas arqueológicas, y exponerlas a través de ejemplos prácticos". Para lograr tales objetivos, sigue los siguentes pasos: a) descripción a través del lenguaje matemático, b) descripción de un ejemplo práctico y c) comentarios sobre las limitaciones del método. Todo este proyecto lo lleva a cabo a través de una introducción y ocho capítulos, en los cuales, con una exposición clara y didáctica, responde en términos matemáticos y arqueológicos a las diferentes preguntas que un arqueólogo se plantea frente a un hallazgo. ¿Qué es esto? ¿Qué antigüedad tiene? ¿De dónde procede? ¿Para qué servía?

La Introducción viene a ser una declaración de principios. Así como las matemáticas tratan de ciertos entes abstractos (números, triángulos, ecuaciones), la arqueología debe buscar modelos y relaciones entre modelos a fin de interpretar objetivamente los hallazgos. Pero el arqueólogo se enfrenta con gran cantidad de datos, aparentemente desordenados. La matemática proporciona entonces la metodología que permite filtrar los datos, establecer relaciones y confirmar modelos. Un buen modelo tiene que ser lo bastante complejo para reflejar el mundo real, y lo bastante simple para ser sometido a las matemáticas. Para construir un modelo que cumpla ambos requisitos, se propone una serie de reglas que constituyen el llamado "ciclo estadístico". Digamos, de paso, que la mayor parte de los conceptos matemáticos utilizados son en realidad conceptos estadísticos. El ciclo estadístico consiste en pasar de la *teoría* (hipótesis) a la *realidad* (datos) mediante la *idealización estadística*. El papel del arqueólogo consiste en interpretar los resultados del análisis estadístico, y así retornar a la hipótesis (que puede ser rechazada y entonces hay que replantear el modelo), completando el ciclo.

El capítulo 2 responde a la pregunta *¿qué es esto?* A través de la descripción de diferentes utensilios (ollas, hachas, vasijas), se motiva al lector sobre la necesidad de clasificar y se sientan las bases de lo que debe ser una buena clasificación. Y entonces se contrapone la aproximación intuitiva (o sea, clasificar a ojo) a la aproximación matemática. Quizás el autor debiera mencionar que existen bastantes métodos matemáticos de clasificación, y no siempre el arqueólogo (sobre todo si es francés) partirá de las mismas premisas. Como este capítulo describe brevemente las principales técnicas de análisis multivariante, resulta algo denso en contenido. El análisis de componentes principales se utiliza para describir el tamaño y forma de un objeto, que el autor aplica para ilustrar las diferentes formas de puntas de lanza.

La taxonomía matemática se utiliza para clasificar objetos, agrupándolos en clases homogéneas, cada vez más amplias, organizadas jerárquicamente, y que se representan gráficamente mediante un dendrograma. Pero, como se trata de un método discontinuo (pequeñas variaciones sobre la similaridad de los objetos pueden afectar al resultado de la clasificación), el autor opta por la técnica de agrupamiento (no jerárquico) de las K-medias. Tales técnicas operan sobre una matriz de correlaciones entre las variables o de disimilaridades entre los objetos. Se hace una breve referencia al "multidimensional scaling" (análisis de proximidades), presentado como alternativa, aunque en realidad se trata de una técnica complementaria (la representación espacial) de las técnicas de agrupamiento (el dendrograma). No aparece ni una sola fórmula que describa en términos matemáticos las diferentes técnicas explicadas, ni tan siquiera para el cálculo de las disimilaridades entre objetos, pero los ejemplos prácticos pueden considerarse ilustrativos.

El capítulo 3 da respuesta a *¿qué antigüedad tiene?* Como la antigüedad de un objeto es un dato netamente arqueológico, el conjunto de técnicas que se describen posee mucha más personalidad. El problema de la cronología absoluta y relativa se resuelve hábilmente dándole un contexto matemático. Así, la estratigrafía arqueológica (estudio de la relación temporal entre dos o más objetos) se reduce a la construcción de un conjunto parcialmente ordenado, o retículo, que puede ser representado mediante un diagrama. El problema de la seriación o cronología relativa se resuelve suponiendo que los objetos a datar están situados sobre un trozo de curva (que suele adoptar la forma de herradura) y, por ende, ordenados desde el más antiguo (origen de la curva) hasta el más moderno (extremo de la curva). A tal fin se comenta el método de Robinson y el método basado en el análisis de proximidades, que proyecta la curva-tiempo en un plano y resulta más atractivo matemáticamente.

No menos interesante es la llamada datación científica, en especial la que se consigue a través del carbono 14. Dos dataciones pueden combinarse para conseguir otra más precisa, pueden compararse estadísticamente o ser modificadas teniendo en cuenta la relación estratigráfica. También es útil la explicación sobre la curva de probabilidad de una datación (uniforme, normal, exponencial), así como la relación con la teoría de la renovación. Todos estos conceptos permiten comprender mejor el alcance y significado de las dataciones cronológicas.

El capítulo 4 (*¿De dónde procede?*) contiene dos partes bien diferenciadas. La primera comenta brevemente cómo agrupar objetos arqueológicos en posibles "fuentes" a partir de elementos traza y cómo decidir si un objeto pertenece a una determinada fuente. Para el agrupamiento se propone de nuevo la técnica de las K-medias, mientras que la asignación de un objeto a una de las posibles fuentes ya definidas se resuelve mediante análisis discriminantes. La segunda parte explica cómo interpretar los modelos formados al se-

ñalar en un mapa la distribución de instrumentos en una o más fuentes. Existen diferentes procedimientos de trazar y cuantificar los objetos. La utilización de modelos estadísticos puede arrojar luz sobre el problema de las interpretaciones contradictorias. El autor comenta el modelo de regresión lineal simple y el modelo de las superficies de tendencia (bien conocido en geoestadística), que permiten resolver cuestiones interesantes acerca del medio de transporte o del valor pecuniario de diferentes tipos de objetos arqueológicos.

En el capítulo 5 (*¿Para qué servía?*), el papel de las matemáticas es menos efectivo, pues en este tema sigue prevalenciendo el criterio y la experiencia del arqueólogo. No obstante, algunas técnicas matemáticas, tomadas de otras disciplinas, se aplican con éxito. El análisis factorial se aplica para interpretar tipos de herramientas como factores en la cultura Musteriense. El análisis canónico de poblaciones se aplica para resaltar las diferencias entre grupos prestablecidos. Algunos modelos de distribución de artefactos, tomados de la geografía y la ecología vegetal, son también útiles, aunque el autor es partidario de los métodos recientes, especialmente desarrollados para la arqueología, que consiguen demostrar que la función de los utensilios, especialmente los líticos, se pueden estudiar sistemáticamente a través de sus asociaciones con otros utensilios.

El capítulo 6 (*Trozos y pedazos*) trata de la reconstrucción de utensilios a partir de fragmentos, mediante ciertas propiedades geométricas elementales, y del problema de cómo estimar las proporciones de distintas especies encontradas en un yacimiento, utilizando como información muestras de huesos de animales.

El capítulo 7 (*Mapas de distribución*) repasa los patrones de asentamiento. Tras exponer pormenorizadamente ejemplos prácticos, describe los principales modelos de patrones de distribución (al azar, uniformes y agrupados) y las formas de detectarlos (relación varianza-media y análisis del vecino más próximo).

El capítulo 8 (*¿Hay un problema que resolver?*) advierte al lector del peligro de sacar conclusiones apresuradas. Comentando brevemente el contraste de hipótesis (pruebas de significación), aborda el llamado problema de las *líneas ley* en un yacimiento (¿es estadísticamente aceptable que varios puntos en línea recta en un yacimiento se interpreten como deliberadamente alineados?), y si se puede admitir la existencia de una unidad de medida básica (como la "yarda megalítica").

El capítulo 9 (*Recapitulación y futuro*) comenta brevemente otros temas matemáticos de interés (análisis de Fourier, teoría de las catástrofes, estadística bayesiana, conjuntos borrosos, etc.), y menciona en especial el tema de la informática y microinformática, advirtiendo del peligro de utilizar alegremente los paquetes estadísticos.

El libro de Clive Orton no contiene fórmulas matemáticas, pero dedica un apartado para orientar al lector dónde puede encontrar detalles de los métodos y aplicaciones que conciernen a los temas tratados. Desde luego no enseña ni matemáticas ni estadística, pero demuestra cómo ambas materias conectan con la arqueología. (C. M. C.)

GENÉTICA MOLECULAR. Selección e introducción general de Antonio Prevosti. Prensa Científica, S.A.; Barcelona, 1987.

Bajo el título genérico de *Genética molecular* la editorial Prensa Científica nos presenta un nuevo volumen de la colección de "Libros de Investigación y Ciencia". Se trata de una serie de 19 artículos, publicados anteriormente en *Investigación y Ciencia* entre los años 1979 y 1987, seguida de una breve pero interesante referencia biográfica de los autores de los artículos originales y de una sucinta bibliografía para profundizar en cada trabajo; cierra el libro un índice, muy útil, de términos y autores, y lo abre una introducción realizada por el profesor Antonio Prevosti, que durante mucho tiempo fue catedrático de genética de la Universidad Central de Barcelona –actualmente es emérito–, quien también ha llevado a cabo la selección de los trabajos. Como es habitual, los autores de los artículos originales son buenos especialistas del tema correspondiente y la traducción al español es de la alta calidad que cabría esperar de los capacitados científicos que la han realizado. Las ilustraciones y fotografías al microscopio óptico o electrónico también mantienen su excelente nivel acostumbrado y, en ocasiones, lo superan, lindando con la excelencia de ciertos grabados artísticos que antaño eran tradición en las ciencias naturales; tal es el caso de unos magníficos dibujos polícromos de diversas especies de tucanes que presiden el artículo sobre "Filogenia de la aves mediante comparación de ADN"; pasando al polo más moderno de técnicas de ilustración, es notable la gráfica por computadora sobre la unión de una proteína del fago lambda al ADN a partir de datos obtenidos por difracción de rayos X.

En cuanto al contenido, puede ser interesante comparar esta *Genética molecular* con la obra que, bajo el mismo título, publicó Gunther S. Stent, cuya primera versión española la ofreció la editorial Omega en 1973. El libro de Stent constituye hoy un clásico en la materia y fue de lectura obligada durante bastantes años. Pues bien, en la obra de Stent, excepto unos primeros de carácter introductorio, los capítulos versan invariablemente sobre la estructura y operaciones a que se ven sujetos los ácidos nucleicos de las bacterias y los virus bacterianos; únicamente el último capítulo, cuyo vago título es "Relaciones", trata de la genética molecular de las células con núcleo; los epígrafes de dicho capítulo final son un auténtico alarde, vistos desde la perspectiva actual, de capacidad premonitoria: la estructura del cromosoma, las relaciones entre núcleo y citoplasma, la mitocondria, la diferenciación celular, la respuesta inmunitaria y el cerebro aparecen allí señalados como los temas de los que debería ocuparse la genética del futuro –hoy ya nuestro presente–. Es significativo el que los términos se hayan invertido en la *Genética molecular* del año 87: la mayoría de los artículos seleccionados tratan de problemas típicos de organismos eucariotas; es más, cuando aparecen bacterias lo hacen fundamentalmente en tanto que medio de abordar también distintos aspectos de la genética de los eucariotas. Se trata, como Prevosti señala en la introducción, de un signo de los tiempos.

Precisando algo más la comparación entre ambos textos, podemos maravillarnos al ver cómo todos los epígrafes antes citados aparecen ahora en uno o varios artículos de *Investigación y Ciencia*. No obstante, es muy importante recalcar que la coincidencia se limita a los títulos, no a los contenidos: el avance de la genética ha sido tal en los últimos lustros que problemas que Stent podía únicamente mencionar, aparecen en la actualidad como básicamente resueltos o en vías de solución. Por ejemplo, cuando Stent habla de la estructura del cromosoma nuclear lo hace para decir que es un misterio, mientras que en el libro actual el nucleosoma aparece como una solución detallada de ese antiguo misterio; cuando Stent habla de las relaciones entre núcleo y citoplasma se ve obligado a limitarse a señalar que tales relaciones deben ser complejas, mientras que en el libro actual aparece descrita la, efectivamente compleja, maduración que experimentan las moléculas de ARN que se sin-

tetizan en el núcleo, antes de ser exportadas al citoplasma, proceso durante cuya elucidación se descubrió que algunas moléculas de ARN están dotadas de actividad catalítica, un concepto muy original que echó por tierra la centenaria creencia de que todas las enzimas debían tener un componente proteico; a su vez –todo esto se describe en el texto actual– estas ribozimas constituyen por sí mismas un indicio adicional de que el material genético primordial debió ser ARN más que ADN.

En la obra antigua nos bastaba con saber que las mitocondrias poseen su propio ADN; en la colección actual se describe en detalle el sistema genético mitocondrial, que, por cierto, ha proporcionado otra gran sorpresa: el descubrimiento de que la clave genética usada por bacterias y núcleos no es totalmente universal. En el campo de la diferenciación y el desarollo hemos pasado de la demostración de que los núcleos somáticos son totipotentes gracias a los experimentos de trasplante nuclear, a la caracterización detallada de los genes que controlan el desarollo –terreno en el que el español García-Bellido y su equipo han adquirido justa fama– por refinados medios de genética clásica y por un enfoque molecular complementario aún incipiente. El libro actual también nos informa de la génesis de la diversidad de anticuerpos que puede sintetizar cada individuo de una especie, algo enigmático a principios de los 70.

Para que esta comparación no sea absolutamente triunfalista conviene terminarla afirmando que en neurogenética no estamos hoy mucho más adelantados que antaño; aunque sabemos de la existencia y modo de síntesis de diferentes neuropéptidos –algunos de ellos, poliproteínas– que controlan ciertos comportamientos sencillos, no se ha resuelto el complicado problema del control genético del neurodesarrollo, y menos aún de la base genética posible de importantes diferencias de comportamiento entre individuos coespecíficos; no obstante, el progreso de las técnicas moleculares, estadísticas e informáticas nos permite confiar en que la "genética molecular" del año 2000 pueda vanagloriarse de contener la solución de estos problemas.

La colección actual se ocupa asimismo de 3 áreas que escaparon a la profecía de Stent. La primera es la de la existencia de segmentos de ADN que pueden transponerse en el genoma; aquí el profesor Prevosti se ha inclinado por un artículo referente a los elementos transponibles del maíz, bien para reforzar la presencia de los eucariotas, bien como homenaje a la doctora Mc Clintock, descubridora precoz del fenómeno en esa especie; cabría, no obstante, argumentar, en honor de los genéticos bacterianos, que la importancia y los detalles de la transposición no quedaron patentes hasta que ellos se ocuparon de la cuestión. La segunda es la referente al uso de datos moleculares en taxonomía, y para decidir entre diversas filogenias posibles o entre varios mecanismos de la evolución molecular; es natural que a un reputado evolucionista, como el doctor Prevosti, no se le haya escapado la importancia de esta área. La tercera es, bastará con nombrarla, la ingeniería genética.

En conjunto se trata de una colección sabiamente elegida, equilibrada y representativa de la actual genética molecular; para mi gusto sólo se echaría en falta algún artículo sobre la moderna oncogenética, campo de gran interés y actualidad, en el que algún español, como Barbacid, ha hecho contribuciones relevantes. (J. R. M.)

The eagle's nest. Natural History and American Ideas, 1812-1842, por Charlotte M. Porter. The University of Alabama Press; 1986.

Hace quince años, la limnología española marcaba un hito con el estudio y publicación del desarrollo de la vida en un medio creado por el hombre: los embalses de la península. Los útiles entonces empleados –teóricos e instrumentales– habían alcanzado la precisión suficiente para que las conclusiones sigan siendo válidas en líneas generales. Hace más de 150 años, la historia natural norteamericana –botánica, zoología y mineralogía– se enfrentaba con un medio tampoco hollado antes: la flora, la fauna y los accidentes geográficos de su inmenso territorio. Una nación joven que sentía una profunda ilusión por conocer lo que ya amaba, y que tuvo su impulso motor en la figura de Thomas Jefferson.

Se había éste revelado, en sus *Notes on the State of Virginia*, contra la teoría de Buffon según la cual las especies del Nuevo Mundo se encontrarían debilitadas y degeneradas, idea que, aplicada al hombre, justificaría el retroceso de las tribus indias. (El lector hispanohablante dispone de una monografía importante sobre el contexto social y político: *Thomas Jefferson, el hombre... su mundo... su influencia...;* Tecnos, Madrid, 1976. Si quiere profundizar en el contexto científico, hallará sólida documentación en la obra de John C. Greene: *American Science in the Age of Jefferson*; The Iowa State University Press, 1984.) Para que no quedara en dictados grandilocuentes animó cuantas actividades –expediciones– se encaminaran a descubrir y catalogar el ingente patrimonio que se le había concedido y puso las bases de las instituciones (museos, bibliotecas y centros de enseñanza) que le dieran soporte orgánico.

Charlotte M. Porter aborda el legado de Jefferson en su manifestación desde lo que se ha llamado la segunda guerra de independencia (1812) hasta el año de la muerte de Amos Eaton (1842). Lo que venga después está dominado por la figura señera de Agassiz, cuya muerte coincide con el nacimiento de la biología moderna en institutos de investigación *more moderno*.

Divide la obra en cuatro partes: precedentes, objetivos, Nueva Armonía y publicaciones. Antepone una invitación introductoria donde describe la atmósfera que respiraban los pioneros, aprehendida en la confesión de Ticiano Peale, a sus dieciocho años y de exploración por el Missouri, que da título a la obra: nos sentíamos "como una gansa en posesión apacible de un nido de aguiluchos".

La naturaleza no estaba degenerada. Afirmarlo era recrearse en vana filosofía que se daba de bruces ante la diversidad de aves, sobre todo, que se iban hallando y que pasaban a las vitrinas de los museos, para recreo y enseñanza de los ciudadanos. Tarea taxidérmica y pictórica que elevó a alto rango Charles Willson Peale. Si las innovaciones en el método de conservación permitían ver los ejemplares "al natural", los álbumes de insectos, peces, reptiles y mamíferos hablaban, plásticamente, de un nuevo mundo. Hasta los fósiles –*Mastodon, Megalonyx, Elephans, Bos* y *Cervus*– corroboraban el carácter único de los animales que allí habían vivido.

Los restos arqueológicos desechaban también las hipótesis de la degeneración. Ante un supuesto nivel inferior que igualaría indios, negros y antropoides, los restos desenterrados de tumbas corroboraban que los aborígenes eran robustos, bien plantados, de estatura pareja, si no mayor, que la media europea. La antropología naciente no se limitó al estudio de los restos óseos, sino que se adentró en la morfología y sintaxis de las lenguas habladas y, así, sobre esa base de lingüística comparada, Benjamin Smith Burton defendió la unidad de la especie humana.

Una idea que en España venía debatiéndose, desde Tournefort, quien logró transformar los catálogos florís-

ticos en sistema –o decir del "éloge" que le dedicó la Real Academia de París en su muerte– era la de imponer una norma, o criterio en la clasificación. Tras el sistema "artificial de Linneo, que encuadraba las plantas en razón de su aparato sexual (pistilos y estambres), Jussieu en 1789 y Decandolle más tarde abogaron por un sistema "natural". ¿Cómo debían clasificarse las especies del Nuevo Mundo? En esta tarea sobresalió Rafinesque, autor también de una teoría de la especiación, en cuyo marco exigía desviaciones naturales y sucesivas –genéricas o específicas– de las plantas, treinta años antes de Darwin.

"Nueva Armonía" sintetiza muy bien la mentalidad norteamericana de ese tiempo. Pretendía crear un nuevo hombre en un mundo nuevo con la educación como medio transformador y en una simbiosis entre vida culta y gobierno. Al ensayo le dedicó su fortuna Maclure, y por él abandonó incluso su obra mineralogista. (El empeño de ese mecenas, sin mayor fortuna, constituye la parte más trabajada de la exposición de Porter.) Esa fue la suerte con la que muchos soñaron: vivir en un mundo apacible, removido sólo por el salto del Niágara. (L. A.)

LAS CIENCIAS MÉDICAS BÁSICAS EN LA VALENCIA DEL SIGLO XIX. José María López Piñero, M. J. Báguena Cerveller, J. L. Barona Vilar, J. L. Fresquet Febrer, M. L. López Terrada, J. Pardo Tomás y V. L. Salavert Fabiani. Valencia, 1988.

Quienes opinan, entre nosotros y allende nuestras fronteras, que sólo los estudios de temas universales tienen sentido en historia de la ciencia, a no ser que tengan un concepto angelical de la ciencia, deberían leer esta monografía. Una de las líneas de investigación, desde que el profesor López Piñero se hizo cargo de la docencia e investigación de historia de la medicina en la Facultad de Medicina de Valencia, ha sido precisamente ésta y el objetivo analizar en profundidad el cultivo de los saberes médicos y científicos en el País Valenciano, con la doble intención de contribuir al estudio de la tradición científica local y aportar material de un escenario concreto a la investigación histórica comparada de la difusión de dichos saberes en los distintos países europeos.

Como indica el título, se analiza la evolución de las ciencias médicas básicas en la Valencia del siglo XIX. En primer lugar, las ciencias morfológicas por J. M. López Piñero, en el que partiendo de la tradición anatómica valenciana se analiza el colapso del cultivo de la anatomía en el primer tercio del siglo XIX, la asimilación de las nuevas corrientes en los años centrales de la centuria, lo que el autor llama "etapa intermedia", y por último la importancia de la morfología darwinista y de la histología en la Valencia de la Restauración. El tercer capítulo es un estudio de las ciencias fisiológicas por J. L. Barona Vilar que, comenzando por el período final de la fisiología ilustrada, reconstruye la evolución de estos saberes, muy especialmente la influencia del movimiento positivista en la introducción de la fisiología general y la defensa de la experimentación. Del cultivo de la microbiología en Valencia se ocupa M. J. Báguena Cerveller, analizando sus orígenes desde la vacunación antivariólica hasta las implicaciones de la epidemia de 1890 en su desarrollo. Por último, J. L. Fresquet Febrer estudia el paso de la materia médica a la farmacología experimental desde el *Compendio de materia médica* de Máximo Antonio Blasco (m. 1804) a los textos plenamente modernos de Amalio Gimeno (1850-1935) y Vicente Peset Cervera (1855-1945). El primer capítulo es un espléndido estudio del marco institucional por M. L. López Terrada, J. Pardo Tomás y V. Salavert Fabiani, en el que se analiza la situación de la universidad española en el siglo XIX y la enseñanza de la medicina en España en ese período, centrándose de forma especial en su organización en Valencia, así como los medios materiales con que se contaba, la evolución de profesores y estudiantes y otras instituciones que tuvieron importancia en la medicina valenciana del siglo XIX, como el Instituto Médico Valenciano y, en menor medida, la Real Academia de Medicina. Conociendo la orientación de López Piñero y su grupo por hacer una historia social y total, este primer capítulo adquiere un especial significado integrador.

Ya hace muchos años, al menos en 1969, que López Piñero habló de tres etapas de la medicina valenciana del siglo XIX. En aquellos momentos lo presentaba como una hipótesis que había que verificar más exhaustivamente; sin embargo, la investigación histórica posterior lo ha ratificado de forma absoluta. El lector de los cinco capítulos de este volumen comprobará fácilmente las características peculiares que tuvo el cultivo de las ciencias médicas en la Valencia del siglo XIX. La conclusión a la que puede llegarse podría concretarse en tres hechos fundamentales.

El primero de ellos fue el colapso de la medicina valenciana durante el primer tercio de la centuria. Se trata de un fenómeno general de la medicina española de la época, que culminó en los años de la guerra de la Independencia y el reinado de Fernando VII. Sin embargo, en Valencia no solamente significó la frustración de la trayectoria propia de la Ilustración y, en concreto, de las posibilidades abiertas por el plan Blasco de 1786, sino algo todavía de mayor alcance: puso punto final a la tadición de la escuela médica valenciana, principalmente en anatomía y materia médica, que desde el Renacimiento tuvo una posición destacada dentro del panorama español.

El segundo hecho fue la ausencia de institucionalización sólida que condicionó el proceso de recuperación, tanto en la "etapa intermedia" formada por las décadas centrales del siglo XIX, como durante los años de la Restauración. El modelo universitario centralista y uniforme fue el principal factor responsable de esta ausencia, que condujo a que la asimilación de las nuevas corrientes europeas dependiera en Valencia exclusivamente del esfuerzo de personas o grupos muy reducidos de mentalidad experimentalista. Ello explica, asimismo, la fragilidad de la recuperación, que volvió a quedar frustrada al final de la centuria.

El tercer hecho corresponde a las diferencias de ritmo y de desarrollo que presentan las cuatro áreas estudiadas. En un extremo puede situarse las ciencias morfológicas y la farmacología que, a pesar de grandes limitaciones, fueron las primeras en recuperarse y alcanzaron después una altura considerable. En el polo contrario, la trayectoria de las ciencias fisiológicas se redujo a una serie de intentos de aparición más tardía, que, además, no llegaron realmente a cristalizar. La microbiología ocupa una posición especial, debido principalmente a que no contaba con una tradición anterior al punto de partida de la moderna bacteriología médica. Hay que añadir que, por encima de estas diferencias, el movimiento experimentalista valenciano del último tercio del siglo XIX tuvo una cierta orientación propia, común a las cuatro áreas, uno de cuyos elementos fundamentales fue el peso del evolucionismo darwinista.

La monografía en su conjunto ofrece una reconstrucción que distingue el nivel normativo de la actividad real y establece la relación de la difusión de los conocimientos y de las prácticas con sus condicionantes. Y a ello se ha podido llegar gracias a la integración de la información procedente de diversos tipos de fuentes. (E. B.)

Apuntes

A veces, refugios y reservas naturales pueden convertirse en ratoneras; y lo que se cerró para conservación de determinadas especies en peligro de extinción, en focos de extinción real. Se aduce en prueba la mortandad sufrida por las aves del Waterfowl Refuge de California a causa de las aguas envenedadas con toxinas donde abrevaban. Las amenazas más directas son siempre las escorrentías de los campos de labor cercanos, que arrastran pesticidas y metales pesados.

Tres son los objetivos que se ha marcado el recientemente erigido Instituto Europeo de Tecnología: aunar esfuerzos de la industria y la universidad para investigación de la que puedan resultar patentes innovadoras (biotecnología, informática y nuevos materiales), intervención de las compañías sufragadoras en la red de centros públicos de investigación y ofrecer cursos de capacitación en gestión de nuevas técnicas. Ninguna empresa española participa todavía en ese proyecto, que puede considerarse complementario del EUREKA.

La densidad de cursos fluviales controla el relieve local de una zona. Esa tesis de la geomorfología podría sustituirse por su lectura inversa, de ser cierto el nuevo modelo propuesto: la estructura fluvial dependería del gradiente de inclinación de las laderas de las colinas.

Los cicádicos son una familia de homópteros que acaban de prestar un buen servicio a la genética, ciencia que reconoce en la edad de la madurez reproductora y en la longitud del ciclo de vida dos componentes importantes de la estrategia para la supervivencia. Las modificaciones de esa edad inciden en la eficacia biológica, cortan el flujo génico y conducen a la especiación. Distintas poblaciones de *Magicicada septendecim* y *M. tredecim* alteran su ciclo vital (de 17 años la primera pasa a 13, y de 13 la segunda pasa a 17) quedando aisladas del resto, listas, por tanto, para evolucionar por su cuenta.

A pesar de las objeciones morales y las dificultades prácticas que conlleva, el gobierno inglés ha decidido acometer un plan de análisis de sangre para detectar la incidencia del virus del síndrome de inmunodeficiencia adquirida entre la población británica. Las dificultades obedecen a que se realizará sin que los interesados se presten a ello voluntariamente, aunque se guardará el anonimato. En Inglaterra ha decaído el número de personas que daban su consentimiento a ese tipo de pruebas.

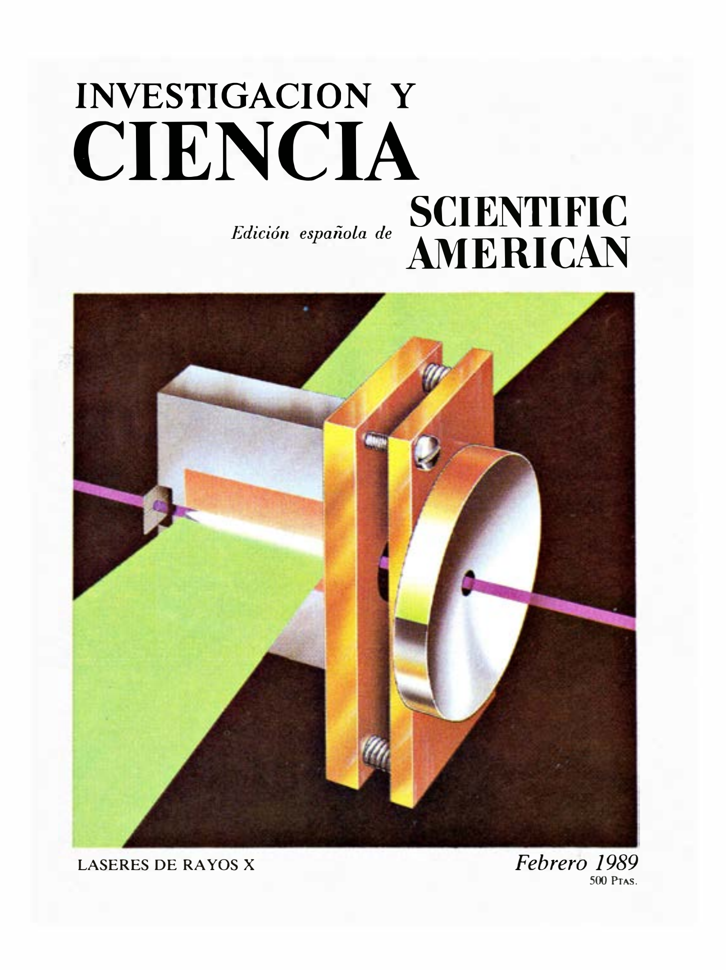
La Oficina Espacial Europea ha escogido la misión Cassini/Titán para su próximo proyecto espacial, a los seis años de la aprobación de aquélla. Se llevará a cabo en colaboración con la NASA y tendrá por objetivo estudiar la atmósfera de Titán, el mayor satélite de Saturno, cuya atmósfera, rica en nitrógeno, podría contener moléculas prebióticas de extraordinario valor para entender el origen de la vida en nuestro planeta.

Dice la hipótesis Gea (o Gaia si concedemos el barbarismo) que la biosfera está capacitada para mantener el clima general de la tierra dentro de unos límites tolerables. Se ha supuesto que el plancton desempeñaría el papel de control decisivo; en particular, en su emisión de dimetil sulfuro. Pero mediciones recientes de dioxido de sulfuro arrojado a la atmósfera por acción humana no confirman en absoluto esa fuerza. Y, al destruir ese punto de apoyo, son muchos los científicos que niegan la hipótesis de Gea, o de Lovelock, su progenitor.

Doncho Kostov fue un famoso citogenético búlgaro que descubrió la importancia de los cromosomas en la evolución. Le costó la vida. No fue el único asesinado por sus ideas genéticas contrarias al marxismo lisenkoysta. Arutvunova, Orlov y Sarana, entre otros, fueron también pasados por las armas. Con los nuevos aires que soplan allende el telón de acero, Ostov acaba de recibir la medalla Dimitrov, el máximo galardón científico de su país.

Cuando dos núcleos pesados chocan a gran energía, crean un sistema de muchos cuerpos cuya densidad supera enormemente la habitual en cualquier otra parte. En esas colisiones, los físicos deberían poder investigar la termodinámica de la materia que interacciona fuertemente, y que es la propia de los hadrones (protones y neutrones, entre otros), o de sus quarks constituyentes. Lo que les llevaría a conocer mejor qué ocurrió en los instantes iniciales del universo. Varios experimentos del CERN muestran que en esos choques aparecen señales de un nuevo estado de la materia, sólo predicho hasta ahora: el plasma de quarks y gluones.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ISAAC PERAL, por Laureano Carbonell
La conciencia de los malos augurios que ensombrecían el futuro de España en el último tercio del siglo pasado le impulsaron a proyectar un submarino que contribuyera, desde la innovación técnica, a ahuyentarlos.

FASE GEOMETRICA, por Michael Berry
El circuito que traza una curva cerrada en un espacio abstracto permite explicar el desplazamiento de la función de onda de la partícula.

PLASTICIDAD EN EL DESARROLLO CEREBRAL, por Chiye Aoki y Philip Siekevitz
La estructuración reticular del cerebro se produce después del nacimiento y viene condicionada por las primeras experiencias. La proteína MAP2 interviene en los procesos moleculares implicados.

SUELOS MODELADOS, por William B. Krantz, Kevin J. Gleason y Nelson Caine
Esas manifestaciones insólitas de geometría natural que descubrimos en los suelos débense a un fenómeno físico bastante común.

LA FECUNDACION EN MAMIFEROS, por Paul M. Wassarman
Los acontecimientos que preceden y siguen inmediatamente a la fusión entre el óvulo y el espermatozoide se suceden con rigor y precisión. Lo curioso del caso reside en que detrás de ello hay una misma molécula decisiva.

LASERES DE RAYOS X BLANDOS, por Dennis L. Matthews y Mordecai D. Rosenn
Un cuarto de siglo después de que apareciera el láser óptico, los láseres experimentales de rayos X habían empezado a producir haces de fotones con longitudes de onda 100 veces más cortas que la de la luz visible.

SERPIENTES, CIRCULACION Y GRAVEDAD, por Harvey B. Lillywhite
Cuando una serpiente se encarama o yergue, su sistema cardiovascular debe resistir enormes gradientes de presión. Esos efectos atribuibles a la gravedad explican la diferencia entre una serpiente de tierra y otra marina.

INGENIEROS DE CANALES EN EL PERU PREINCAICO, por Charles R. Ortloff
Los ingenieros de Chimor construyeron canales para transportar agua desde los ríos hasta campos que distaban incluso 70 kilómetros. Sólo han podido con ellos las fuerzas persistentes de la naturaleza.

